



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**NÁVRH FILTRAČNÍ JEDNOTKY PRO ČIŠTĚNÍ  
ODPADNÍHO PLYNU**

DESIGN OF A FILTER UNIT FOR WASTE GAS CLEANING

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Lukáš Volánka

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. David Jecha, Ph.D.

**BRNO 2021**



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství  
Student: **Lukáš Volánka**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. David Jecha, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Návrh filtrační jednotky pro čištění odpadního plynu

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tuhé znečišťující látky (TZL) jsou emitovány z různých zdrojů v procesech, kde dochází ke spalování i procesech, kde ke spalování nedochází. Z důvodu zachování dýchatelné atmosféry bez vedlejších účinků na lidské zdraví je nutno koncentrace TZL ve vystupujících odplynech redukovat na co nejnižší úroveň. Vhodné technologické řešení pro každou konkrétní situaci se však z důvodu odlišných podmínek může lišit. Proto je nutno v praxi nejdříve technologické podmínky a koncentrace TZL analyzovat a poté je možno navrhnout vhodné řešení odstranění TZL.

### Cíle bakalářské práce:

Popis jednotlivých metod odstraňování tuhých znečišťujících látek.

Přehled legislativních požadavků na tuhé znečišťující látky.

Posouzení zadaného případu se zřetelem na účinnost odstranění sledovaných látek a srovnání naměřených dat s platnou legislativou ČR.

Na základě zadaného případu navrhnout filtrační zařízení pro odstranění tuhých látek z odpadního plynu.

### Seznam doporučené literatury:

STEHLÍK, P. Up-to-date waste-to-energy approach: From Idea to Industrial Application. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 978-331-9154-664.

STRAUSS, Werner. Industrial gas cleaning : the principles and practice of the

control of gaseous and particulate emissions. 2d ed. Oxford : Pergamon Press, 1975. 621 s. ISBN 0080170048.

DOJČANSKÝ, Ján; LONGAUER, Jaroslav. Chemické Inžinierstvo II. 1. vydanie.

Bratislava : Vydavateľstvo MALÉ CENTRUM, 2000. 392 s. ISBN 80-967064-8-9.

NEUŽIL, Lubomír; MÍKA, Vladimír. Chemické inženýrství I. Vyd. 2., upr. Praha :

Vysoká škola chemicko-technologická, 1998. 464 s. ISBN 80-7080-312-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce je zaměřena na návrh filtrační jednotky a na tuhé znečišťující látky neboli TZL, které mají stále významný podíl na znečišťování ovzduší. V první kapitole jsou popsány základní vlastnosti těchto látek a jejich vliv na návrh odlučovače. Další kapitola krátce pojednává o platné legislativě v České republice zabývající se emisními a imisními limity. Ve třetí kapitole, která je zároveň poslední z teoretické části práce, jsou uvedeny a vysvětleny jednotlivé metody odstraňování TZL. Následuje praktická část, věnována zejména návrhu filtrační jednotky pro zadaný případ, která končí měřením emisí a stručným vyhodnocením výsledků.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Tuhé znečišťující látky, TZL, prachové částice, filtrační jednotka, odlučovací zařízení

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis focuses on the design of the filtration unit and on particulate matter, or PM, which is still a significant contributor to air pollution. The first chapter describes the basic properties of these pollutants and their influence on the design of the separator. The next chapter briefly discusses the current legislation in the Czech Republic dealing with emission and air pollution limits. In the third chapter, which is also the last of the theoretical part of the thesis, the individual methods of removal of PMs are presented and explained. The practical part follows, mainly devoted to the design of the filtration unit for the given case, which ends with the measurement of emissions and a brief evaluation of the results.

## **KEYWORDS**

Particulate matter, PM, dust particles, filtration unit, separation device

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

VOLÁNKA, Lukáš. *Návrh filtrační jednotky pro čištění odpadního plynu* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134967>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce David Jecha.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci „*Návrh filtrační jednotky pro čištění odpadního plynu*“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Davida Jechy, Ph.D. a uvedl jsem v seznamu literatury všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne .....

.....

Jméno a přímení

## **PODĚKOVÁNÍ**

Zde bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce za vstřícnost, osobní přístup a cenné rady k práci. Dále děkuji společnosti PRO-FILTR BRNO s.r.o., jejímu řediteli panu Pavlu Kalovi a kolegům za důležité připomínky a možnost realizace tohoto projektu.



# OBSAH

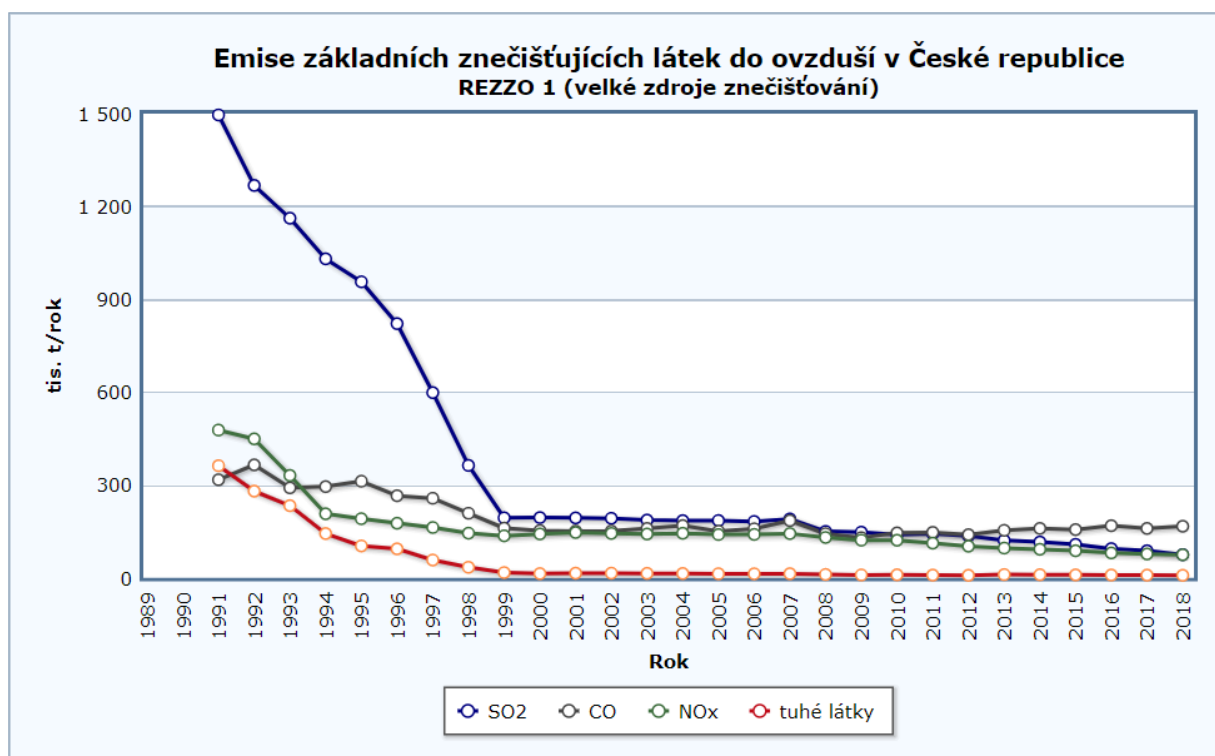
<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1 TUHÉ ZNEČIŠŤUJÍCÍ LÁTKY .....</b>	<b>12</b>
1.1 VELIKOST ČÁSTIC .....	12
1.2 DALŠÍ VLASTNOSTI TZL .....	13
1.2.1 TVAR ČÁSTIC .....	14
1.2.2 LEPIVOST .....	14
1.2.3 VÝBUŠNOST .....	14
<b>2 LEGISLATIVA .....</b>	<b>16</b>
2.1 PŘÍPUSTNÁ ÚROVEŇ ZNEČIŠTĚNÍ .....	16
2.2 PŘÍPUSTNÁ ÚROVEŇ ZNEČIŠŤOVÁNÍ .....	16
2.3 BREF A BAT .....	18
<b>3 METODY ODDAŇOVÁNÍ TZL .....</b>	<b>19</b>
3.1 MECHANICKÉ ODLUČOVAČE .....	19
3.1.1 USAZOVACÍ KOMORY .....	19
3.1.2 ŽALUZIOVÉ ODLUČOVAČE .....	20
3.1.3 VÍROVÉ ODLUČOVAČE .....	20
3.2 LÁTKOVÉ ODLUČOVAČE .....	22
3.2.1 HADICOVÝ FILTR .....	22
3.2.2 KAPSOVÝ FILTR .....	23
3.2.3 REGENERACE FILTRAČNÍHO MÉDIA .....	23
3.2.4 FILTRAČNÍ MATERIÁLY .....	24
3.3 MOKRÉ ODLUČOVAČE .....	24
3.3.1 SKRUBRY .....	25
3.3.2 PĚNOVÉ ODLUČOVAČE .....	25
3.3.3 HLADINOVÉ ODLUČOVAČE .....	26
3.4 ELEKTROSTATICKÉ ODLUČOVAČE .....	26
<b>4 NÁVRH FILTRAČNÍ JEDNOTKY .....</b>	<b>27</b>
4.1 ZADÁNÍ FILTRAČNÍ JEDNOTKY .....	27
4.2 NÁVRH KONCEPCE ZAŘÍZENÍ .....	28
4.2.1 VENTILÁTOR .....	28
4.2.2 FILTRAČNÍ PLOCHA .....	29
4.2.3 POTRUBÍ .....	31
4.2.4 REGENERACE .....	32
4.3 DALŠÍ FUNKČNÍ PRVKY .....	32
4.3.1 SKLÁDANÁ VÝSYPKA .....	33
4.3.2 SAMOČINNÁ GRAVITAČNÍ KLAPKA .....	33
4.3.3 PŘECHODOVÁ KOMORA .....	34

<b>5 MĚŘENÍ.....</b>	<b>36</b>
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>37</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ .....</b>	<b>40</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>41</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>42</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>43</b>

## ÚVOD

Od počátku průmyslové éry představuje vypouštění znečišťujících látek do ovzduší závažný ekologický problém. Z toho důvodu se pro zdroje znečištění začali stanovovat emisní limity, které se dodnes zpřísňují. K odstraňování znečišťujících látek z odpadního plynu slouží filtrační zařízení. Časem bylo vyvinuto mnoho různých metod odlučování, díky kterým je dnes možné filtrovat většinu znečišťujících látek vznikajících prakticky v jakémkoliv provozu, ať už se jedná o spalovnu, elektrárnu nebo například slévárnu. Moderní technologie umožňují výrobu filtračních jednotek, které dosahují odlučivosti i přes 99 %. Odlučivost však není jediným sledovaným parametrem, neméně důležité je zaměřit se na dlouhou životnost, spolehlivost, snadný servis a ekonomičnost provozu.

Existuje celá řada znečišťujících látek, kromě tuhých znečišťujících látek (dále také TZL) má na životní prostředí velmi negativní vliv také oxid siřičitý, oxid uhelnatý a oxidy dusíku. Z údajů, které vydal Český statistický úřad vyplývá, že v dnešní době mají uvedené látky podobný podíl na znečištění ovzduší a v průběhu let se jejich emitované množství za rok nijak výrazně nezměnilo. Avšak na níže uvedeném obrázku 1 lze vidět, že se aktuální hodnoty ustálili až v roce 1999. Například co se týče TZL, tak v roce 1991 bylo do ovzduší vypuštěno v porovnání s rokem 1999 více než desetkrát větší množství za rok. Aby se aktuální trend udržel, je důležité u každého nového zdroje znečišťování navrhnout filtrační jednotku a nežádoucí látky z odpadního plynu odlučovat, což je mimo jiné také cílem této práce [1].



Obrázek 1 Emise základních znečišťujících látek [1]

# 1 TUHÉ ZNEČIŠŤUJÍCÍ LÁTKY

Prašné emise, které nazýváme tuhé znečišťující látky, vznikají zejména v průmyslových procesech jako jsou spalování paliv, drcení, mletí nebo broušení. Přítomnost TZL v odpadním plynu průmyslových závodů má značný dopad na životní prostředí a lidské zdraví, proto je nezbytné tyto částice odlučovat. Některé moderní odprašovací a filtrační zařízení jsou schopny zachytit i částice o velikosti několika mikrometrů, které představují největší hrozbu pro lidský organismus [2].

TZL mohou být i přírodního původu, přičemž se do ovzduší dostanou například následkem fotochemických reakcí nebo vulkanickou činností. Avšak, pokud se nejedná o bezprostřední výskyt, jejich koncentrace v ovzduší je velmi nízká [3].

Příklady největších průmyslových zdrojů TZL [4]:

- Energetické výroby – elektrárny, spalovny, plynárny
- Vytápění tuhými palivy – dřevo, uhlí, koks
- Demoliční práce – drcení, třídění odpadu
- Obrábění kovů – broušení, tryskání, leštění
- Chemický průmysl – výroba hnojiv, organických barviv

## 1.1 VELIKOST ČÁSTIC

Důležitou charakteristikou TZL je velikost jednotlivých částic. Ta se může pohybovat v řádech od  $10^{-3}$  do  $10^4$   $\mu\text{m}$  a je jedním ze základních údajů pro určení granulometrického složení neboli zrnitosti [5].

Podle toho, jestli se určité množství prachu skládá z částic stejné nebo rozdílné velikosti, se jedná o prach monodisperzní nebo polydisperzní, přičemž mnohem častější je výskyt právě polydisperzních souborů částic. U těchto prachů se určuje nejen celkový rozsah velikostí obsažených prachových částic, ale také poměrné zastoupení jednotlivých velikostí v celkovém souboru. Pro zjištění poměrného zastoupení částic se provádějí granulometrické rozborů [5].

Při návrhu filtračního zařízení se metoda odlučování volí na základě několika faktorů, přičemž jedním z nich je právě granulometrické složení prachu. Dalšími důležitými faktory jsou vlhkost a s ní spojená lepivost, teplota odsávaného plynu, rosný bod a další. Správná volba metody odlučování značně ovlivňuje výslednou účinnost zařízení [4].

Příklady základních metod granulometrických rozborů [4]:

- Metody přímé – částice se třídí podle jejich reálné velikosti
  - Optická mikroskopie – pro částice ve tvaru jehliček, šupinek, tyčinek apod.
  - Elektronová mikroskopie – především pro velmi jemné prachy
  - Sítování – pouze pro hrubé prachy
- Metody sedimentační – částice se třídí podle rychlosti pádu v gravitačním poli
  - Třídění částic v proudu plynu
  - Třídění pomocí usazování částic v kapalině

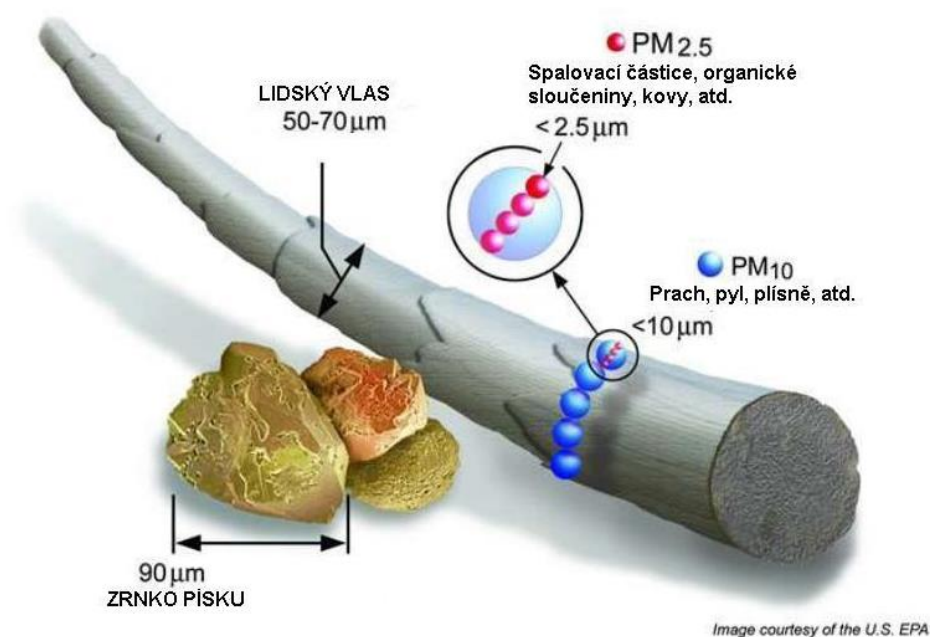
Vzhledem k tomu, že prachové částice mají často nepravidelnou geometrii, byl zaveden další parametr pro určení velikosti, a to ekvivalentní průměr částic. Skutečná částice je nahrazena ekvivalentní kulovou částicí, která má stejné charakteristické vlastnosti jako reálná částice [5].

Velikost částic také značně ovlivňuje, jak působí na lidský organismus. Z tohoto důvodu byli zavedeny kategorie PM částic (Particulate matter), které vždy zahrnují určitou oblast prachů o definované velikosti a popisují jaký vliv má konkrétní kategorie na lidské zdraví [6].

Tři hlavní kategorie PM částic [6]:

- PM<sub>10</sub> – Hrubé částice prachu o aerodynamickém průměru od 2,5 do 10  $\mu\text{m}$ .
- PM<sub>2,5</sub> – Jemné částice o aerodynamickém průměru od 1 do 2,5  $\mu\text{m}$ .
- PM<sub>1</sub> – Velmi jemné částice o aerodynamickém průměru od 0,3 do 1  $\mu\text{m}$ .

Částice PM<sub>10</sub> vnikají pouze do horních dýchacích cest, kdy při krátkodobému vystavení dochází k podráždění dýchacích cest a při dlouhodobém častém vdechování mohou zapříčinit rozvoj vážných onemocnění dýchacího ústrojí. Částice PM<sub>2,5</sub> pronikají i do dolních dýchacích cest a menší částice mohou vnikat až do plicních sklípků [6]. Pro představu je na obrázku 2 srovnání velikostí PM částic a lidského vlasu.



Obrázek 2 Srovnání velikosti PM částic[6]

## 1.2 DALŠÍ VLASTNOSTI TZL

Pro návrh správné odlučovací metody a celkové konstrukce filtračního zařízení je podstatné kromě velikosti sledovat také další vlastnosti částic v odsávaném plynu.

### 1.2.1 TVAR ČÁSTIC

Jak bylo řečeno v kapitole o velikosti částic, geometrie neboli tvar prachových částic je velmi nepravidelný a proměnný, proto ho nelze jednoznačně definovat.

Přesto se částice dělí do tří základních skupin dle tvaru [4]:

- Izometrické částice – Mají hrudkovitý tvar, přičemž rozměry částice v pomyslném trojrozměrném souřadnicovém systému jsou ve všech osách podobné. Z toho důvodu se v praxi často nahrazují fiktivními částicemi kulového tvaru o ekvivalentním průměru.
- Ploché částice – Jak vypovídá název mají plochý tvar šupinek, případně destiček. V pomyslném souřadném systému by dva rozměry byli mnohem větší než třetí, který by reprezentoval tloušťku. Příkladem může být odprýsknutý kousek laku.
- Vlákňité částice – Tvarem jsou podobné vláknům nebo tyčinkám, případně jehlicím.

Jelikož není dostatek vhodných kvantitativních metod pro určení tvaru malých částic, je v některých případech v praxi tvar částic popsán pouze běžným slovním popisem, například kulovité, krychlové, destičkovité nebo jehlicovité [7].

### 1.2.2 LEPIVOST

Ačkoliv není lepidost platnou fyzikální veličinou, má velký význam při konstrukčním řešení filtračního zařízení [4]. Například při volbě filtračního média, metody regenerace, vyprazdňovacího systému filtru nebo typu sběrné nádoby.

Podle lepidosti lze prach řadit do těchto skupin [4]:

- Nelepivý prach – písek, struska, piliny
- Málo lepivý prach – koks, popílky
- Středně lepivý prach – cement, saze, jemný uhelný prach
- Velmi lepivý prach – sádra, vápenec, mouka

Lepivost prachu lze chápat také jako souhrn jevů, které zapříčiní ulpívání prachových částic na stěnách a filtračních plochách odlučovače. Ve značné míře ji ovlivňuje vlhkost, elektrické vlastnosti a složení. Tuto vlastnost není možné nijak přesně definovat a měřit, proto v praxi výše uvedené skupiny udávají pouze hrubou představu o tom, jaký má prach sklon k usazování na stěnách odlučovače a rozděluje se do kategorií pouze na základě provozních zkušeností a poznatků [8].

### 1.2.3 VÝBUŠNOST

Největší vliv na výbušnost nebo hoření látky má stupeň rozmělnění. Jelikož v tomto případě mluvíme o prachových částicích, je běžné, že látka za normálních podmínek nehořlavá, se stává hořlavou nebo dokonce výbušnou při vystavení určitým podmínkám. Zpravidla musí prach být vystaven několika podmínkám současně, aby došlo k výbuchu. Z kovových prachů patří mezi nejnebezpečnější z hlediska výbušnosti především hliník, titan, zirkon nebo železo [9].

Jednotlivé podmínky [9]:

- Množství prachu překročí spodní mez výbušnosti
- Prostředí obsahuje určité množství kyslíku nutné k výbuchu
- Dojde k iniciaci zážehu o dostatečné energii

Meze výbušnosti jsou určité koncentrace hořlavé látky nebo prachu ve vzduchu. Pokud je koncentrace látky pod spodní mezí, tak směs není ani hořlavá, ani výbušná. Pokud se koncentrace nachází v oblasti výbušnosti, tak je látka výbušná za určitých doprovodných podmínek, a jestliže je překročena horní mez výbušnosti, tak je látka hořlavá jen za přístupu vzduchu [10]. Níže v tabulce 1 jsou uvedené spodní meze výbušnosti pro vybrané prachy.

*Tabulka 1 Meze výbušnosti [11]*

Látka	Spodní mez výbušnosti [g/m <sup>3</sup> ]
Obilný prach	125
Uhelný prach	30
Mouka	60
Hliníkový prach	100

Těmto stavům se předchází různými způsoby, například uzemněním celého zařízení, protože zážeh může iniciovat výboj statické elektřiny. Dále se v těchto případech na vzduchotechnický systém instalují bezpečnostní prvky, které zabráňují vzniku požáru nebo výbuchu, například protipožární klapky, protiexplozní ventily nebo membrány odlehčující výbuch, viz obrázek 3 [4].



*Obrázek 3. Instalovaná membrána odlehčující výbuch [12]*

## 2 LEGISLATIVA

Legislativou o vnášení znečišťujících látek do ovzduší se v České republice zabývá zákon o ochraně ovzduší č. 201/2012 Sb. Dle tohoto zákona se ochranou ovzduší rozumí „*předcházení znečišťování ovzduší a snižování úrovně znečišťování tak, aby byla omezena rizika pro lidské zdraví způsobena znečištěním ovzduší, snížení zátěže životního prostředí látkami vnášenými do ovzduší a poškozujícími ekosystémy a vytvoření předpokladů pro regeneraci složek životního prostředí postižených v důsledku znečištění ovzduší*“ [13].

Znečišťující látky jsou takové látky, které mají nebo mohou mít negativní vliv na lidské zdraví, životní prostředí nebo obtěžují svým zápachem [13].

### 2.1 PŘÍPUSTNÁ ÚROVEŇ ZNEČIŠTĚNÍ

Imisní limity, níže uvedené v tabulce 2, určují nejvyšší možnou úroveň znečištění ve venkovních prostředích a jsou stanovené zákonem č. 201/2012 Sb. Platí pro všechny orgány, obce a kraje, které při výkonu svojí působnosti mají nepříznivý dopad na ovzduší. Nevztahují se pouze na ovzduší ve venkovních pracovištích, do kterých není povolen přístup veřejnosti. V následující tabulce jsou uvedeny imisní limity některých znečišťujících látek [13].

Tabulka 2 Imisní limity vyhlášené pro ochranu lidského zdraví [13]

Znečišťující látka	Doba průměrování	Imisní limit	Maximální počet překročení
Oxid siřičitý	1 hodina	350 $\mu\text{g.m}^{-3}$	24
Oxid siřičitý	24 hodin	125 $\mu\text{g.m}^{-3}$	3
Oxid dusičitý	1 hodina	200 $\mu\text{g.m}^{-3}$	18
Oxid dusičitý	1 kalendářní rok	40 $\mu\text{g.m}^{-3}$	0
Oxid uhelnatý	maximální denní osmihodinový průměr	10 $\text{mg.m}^{-3}$	0
Benzen	1 kalendářní rok	5 $\mu\text{g.m}^{-3}$	0
Částice PM <sub>10</sub>	24 hodin	50 $\mu\text{g.m}^{-3}$	35
Částice PM <sub>10</sub>	1 kalendářní rok	40 $\mu\text{g.m}^{-3}$	0
Částice PM <sub>2,5</sub>	1 kalendářní rok	20 $\mu\text{g.m}^{-3}$	0
Olovo	1 kalendářní rok	0,5 $\mu\text{g.m}^{-3}$	0

### 2.2 PŘÍPUSTNÁ ÚROVEŇ ZNEČIŠŤOVÁNÍ

Na rozdíl od znečištění je přípustná úroveň znečišťování stanovena nejen emisními limity, ale také emisními stropy, technickými podmínkami provozu a přípustnou tmavostí kouře [18].

Emisní limity udávají maximální přípustné množství znečišťující látky vnášené do ovzduší ze stacionárního zdroje. Dělí se na obecné a specifické, a platí pro všechny výduchy a komínové průchody do ovzduší. Pro většinu znečišťujících látek nebo jejich skupiny jsou předepsány obecné emisní limity, avšak v některých případech je nutné pro stacionární zdroj určit



specifické emisní limity. Ty stanovuje prováděcí právní předpis nebo jsou součástí povolení k provozu stacionárního zdroje, které vydává krajský úřad (Česká inspekce životního prostředí). Jestliže pro stacionární zdroj je stanoven jeden či více specifických emisních limitů, neplatí pro něj obecné emisní limity [13].

Emisní stropy určují nejvyšší možné množství znečišťující látky vyloučené do ovzduší za jeden kalendářní rok a stanovují se pro vymezené území, provozovnu, stacionární zdroj nebo jejich skupinu. Ve většině případů doplňují emisní limity, ale mohou také nahradit emisní limity pro těkavé organické látky [8].

V následující tabulce 3 jsou uvedeny obecné emisní limity pro jednotlivé znečišťující látky dle přílohy č. 9 vyhlášky č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší [14].

*Tabulka 3 Obecné emisní limity [14]*

Název znečišťující látky	Hmotnostní tok [g/h]	Hmotnostní koncentrace [mg/m <sup>3</sup> ]
tuhé znečišťující látky	≤2500	200
	>2500	150
oxidy síry vyjádřené jako oxid siřičitý	>20000	2500
oxidy dusíku vyjádřené jako oxid dusičitý	>10000	500
oxid uhelnatý	>5000	500
organické látky vyjádřené jako celkový organický uhlík (TOC)	>3000	150
amoniak a soli amonné vyjádřené jako amoniak	>500	50
Sulfan	>100	10
Sirouhlík	>100	20
chlor a jeho plynné anorganické sloučeniny vyjádřené jako HCl	>500	50
fluor a jeho plynné anorganické sloučeniny vyjádřené jako HF	>100	10

Jako příklad jsou níže v tabulce 4 uvedeny předepsané specifické emisní limity pro technologii výroby a tavení neželezných kovů, konkrétně pro dopravu a manipulaci se vsázkou nebo produktem. Tato kategorie zahrnuje úpravářenské zařízení, výrobu forem a jader, čištění odlitků, spalovací procesy a další. Vztažné podmínky A vyjadřují, že emisní limit platí pro koncentraci konkrétní látky v suchém plynu za normálních stavových podmínek (tlak 101,3 kPa, teplota 0 °C). Občas také s udáním referenčního obsahu některé látky v odpadním plynu, obvykle kyslíku [14].

Tabulka 4 Vybrané specifické emisní limity [14]

Emisní limity [mg/m <sup>3</sup> ]				Vztažné podmínky
TZL	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	
50	400	400	800	A

## 2.3 BREF A BAT

Pro většinu průmyslových činností existují takzvané BREF dokumenty neboli referenční dokumenty o nejlepších dostupných technikách (Reference Document on Best Available Techniques). Jejich cílem je stanovit obecně nejlepší dostupné techniky neboli BAT (Best Available Techniques) pro konkrétní procesy s ohledem na emise. Kromě přehledu BAT, obsahují dokumenty BREF zpravidla také popis využívaných postupů, současné úrovně emisí, spotřeby energií, surovin a další. Jedná se o velmi rozsáhlé dokumenty, které vznikly díky systému výměny informací států evropské unie. Dokumenty BREF dále definuje zákon č. 76/2002 Sb. o integrované prevenci a omezování znečištění [15].

Na téma slévárenského průmyslu je zaměřen dokument BREF pro kovárny a slévárny, který kromě jiného také popisuje proces odsávání vzdušiny pro různé dokončovací operace. Například v případě broušení odlitků na stojanových bruskách, je doporučen způsob odvádění odpadních látek pomocí pevných komínů, do kterých je směřován proud pilin. Nejlepší dostupnou technikou pro odstraňování takového prachu jsou cyklony, mokré odlučovače nebo suché tkaninové odlučovače. Broušení a další dokončovací operace probíhají ve slévárně v takzvané čistírně odlitků. Níže (v tabulce 5) jsou uvedeny výsledné koncentrace TZL pro odtah vzdušiny z čistírny odlitků při použití různých typů odlučovačů. Data byla shromážděna v italských slévárnách. Na výsledné emise má významný vliv četnost potřebných dokončovacích operací, která závisí například na technologii výroby odlitků [16].

Tabulka 5 Výsledné koncentrace TZL pro čistírnu odlitků [16]

Typ zařízení	Koncentrace TZL [mg/m <sup>3</sup> ]		
	Průměr	Minimum	Maximum
Tkaninový odlučovač	3	0,4	7,5
Mokrý vírový odlučovač	14,8	7,6	23,3
Mokrý Venturiho systém	2,5	1,1	5,9

Jak je vidět v tabulce, tkaninové odlučovače a mokré Venturiho systémy dosahují podobných výsledků. Obě metody odlučování jsou v tomto případě vhodné a při návrhu filtračního zařízení by byl výběr založen na základě preferencí zákazníka a ekonomičnosti provozu [16].

### 3 METODY ODDAŇOVÁNÍ TZL

Oddaňování TZL z odpadního plynu probíhá v několika fázích. Podle metody odlučování se nejdříve prachové částice musí přivést ke stěnám odlučovače, do usazovací komory nebo přímo k usazovacím filtračním plochám. V této první fázi jsou částice odebrány z plynu působením především gravitační, setrvačné nebo elektrostatické síly [17].

Ve druhé fázi se částice odloučené z plynu musí odvést do sběrného prostoru nebo přímo do sběrné nádoby či kontejneru. Způsob odvedení prachu se liší podle toho, jestli se jedná o mokrý nebo suchý odlučovač. V případě suchých odlučovačů se částice odvádějí mechanicky. Například tak, že prach nacházející se v bezprostřední blízkosti stěny uvnitř zařízení, je sveden do sběrné nádoby usměrněným proudem samotného plynu. U mokrých odlučovačů je princip zpravidla založen na vstřikování vody do usazovací komory, čímž se prachové částice spláchnou do sběrného prostoru. Dále existují elektrostatické a látkové odlučovače, kde je prach zachycen na usazovacích plochách, ze kterých se odvede například oklepáním [17].

V poslední fázi se prach odvádí ze sběrného prostoru pryč z odlučovače. Odvádění prachu může být realizováno buď kontinuálně, například šnekovým dopravníkem nebo v intervalech pomocí samočinné gravitační klapky [17].

#### 3.1 MECHANICKÉ ODDUČOVAČE

Svojí konstrukcí jsou často velmi jednoduché a nejsou náročné na údržbu a servis. Fungují zpravidla díky působení gravitační, setrvačné nebo elektrostatické síly [2].

Rozdělení mechanických odlučovačů [2]:

- Usazovací komory
- Žaluziové odlučovače
- Vírové odlučovače

##### 3.1.1 USAZOVACÍ KOMORY

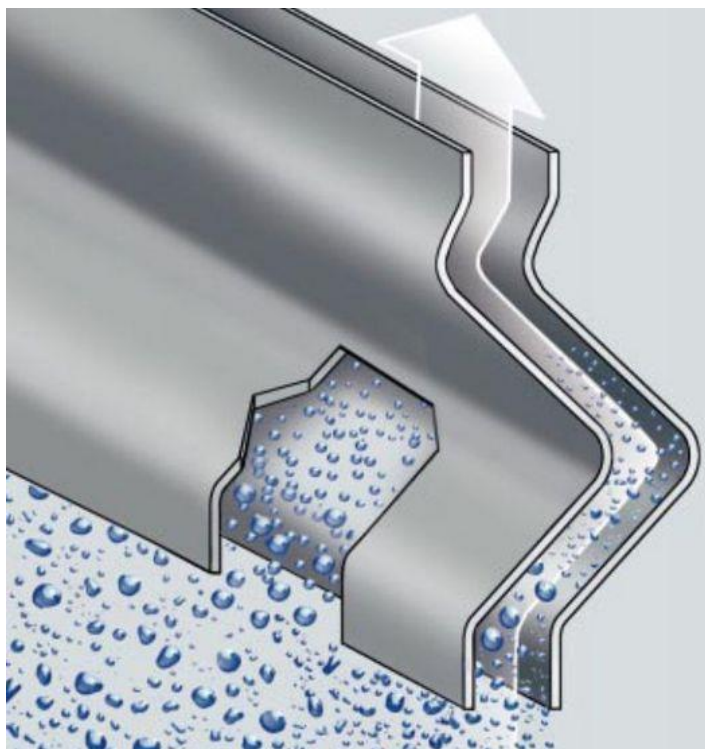
Jedná se o nejjednodušší a zároveň účinnou metodu odlučování hrubých částic využitím gravitační síly. Nevýhodou je, že největší částice se často usazují již ve vodorovných úsecích potrubní trasy vedoucí k odlučovači, avšak správně navržená usazovací komora odloučí z plynu většinu hrubých částic ještě před vstupem do hlavní části filtračního zařízení. Například v případě látkových odlučovačů se tímto způsobem značně sníží zátěž filtračního média, čímž se významně prodlouží jeho životnost [18].

Aby došlo k usazení částic, je nutné v komoře snížit rychlost proudícího plynu na hodnotu pádové rychlosti částice. Snížení rychlosti je zajištěno zvětšením plochy průřezu usazovací komory oproti ploše průřezu vstupního potrubí. Ve spodní části komory se nachází výsypka prachu. [2].

### 3.1.2 ŽALUZIOVÉ ODLUČOVAČE

Žaluziové odlučovače využívají hlavně setrvačných sil. Stejně jako usazovací komory jsou vhodné právě pro separaci hrubších částic prachu, a proto se také často používají jako předodlučovače. Průtok odpadního plynu je usměřován vestavěnými přepážkami neboli žaluziemi směrem ke spodní části zařízení, kde se nachází výsypka. Pro lepší účinnost může být ve spodní části prach odsáván a odveden do dalšího odlučovače, nejčastěji vírového [17].

Mají využití také v mokrých odlučovačích, kde z plynu separují uniklé kapky, viz obrázek 4.



Obrázek 4 Odloučení vodních kapek z průchozího plynu [19]

### 3.1.3 VÍROVÉ ODLUČOVAČE

Vírové odlučovače neboli cyklóny prošli dlouholetým konstrukčním vývojem, ale dodnes všechny typy pracují na obdobném principu. Tvar cyklónu je uzpůsoben tak, že odpadní plyn je ihned po vstupu uveden do spirálového pohybu směřujícího do spodní části cyklónu, kde se nachází výsypka. Podle směru přívodu plynu se dělí na cyklóny s tečným nebo osovým vstupem, viz obrázek 5. Díky velmi dobré odlučivosti se nejčastěji využívá tangenciálního neboli tečného přívodu plynu. Hrubší částice prachu jsou odstředivou silou odloučeny z proudu vzdušniny směrem ke stěnám zařízení, odkud jsou svedeny směrem do výsypky za spolupůsobení gravitační síly [2].

Obecně platí, že s klesajícím průměrem a hustotou částic, se zároveň prudce snižuje odlučivost neboli schopnost odlučovače zachytit vstupující prach. V případě částic s průměrem nad  $10\ \mu\text{m}$  při hustotě vyšší než  $1\ 000\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a hustotě plynu zhruba  $1\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  dosahují cyklóny odlučivosti 80 až 95 %. Jakmile průměr částic klesne pod  $1\ \mu\text{m}$ , vírový odlučovač je nezachytí [4].

Dalším sledovaným parametrem kromě odlučivosti je tlaková ztráta. Lze ji chápat jako energii potřebnou k odloučení částic. Zjednodušeně se dá říct, že s rostoucí tlakovou ztrátou roste i odlučivost, ale nemusí tomu tak být v každém případě. Oba parametry závisí na typu cyklónu, celkovém průtoku plynu a na navržených rozměrech. Pro správný návrh cyklónu je nutné znát několik hodnot. V praxi je obvykle k dispozici alespoň přibližné granulometrické složení odsávaného prachu, průtočné množství vzdušiny a také požadovaná vstupní a výstupní koncentrace částic [8].

Hodnota tlakové ztráty se mění v závislosti na rychlosti vstupujícího plynu v rozmezí od 600 do 1 000 Pa. Za těchto podmínek je možné pro odsávání použít středtlaké jednostupňové ventilátory s axiálním nebo radiálním vstupem. Tlakovou ztrátu můžeme vypočítat ze vztahu [4]:

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho_g [4] \quad (1)$$

Kde použité symboly mají následující význam:

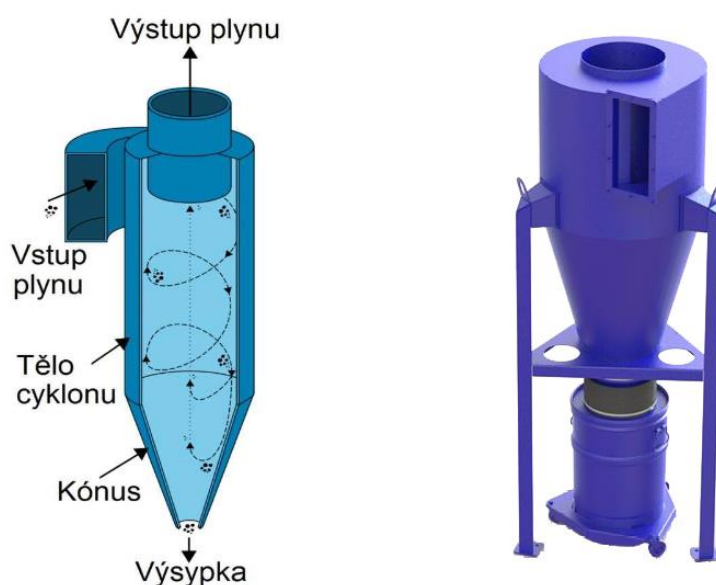
$\Delta p$  [Pa] tlaková ztráta,

$\xi$  [-] součinitel odporu zjištěný experimentálně,

$v$  [m/s] rychlost proudění v potrubí o průměru cyklónu,

$\rho_g$  [kg/m<sup>3</sup>] hustota plynu.

Běžně jsou cyklóny konstruovány pro průtoky plynu od 100 do 25 000 m<sup>3</sup>/h, pouze ve výjimečných případech pro větší průtoky. Pokud je nutné odprašování většího objemu plynu a zároveň je vhodné využití vírového odlučovače, je možné použít takzvaný multicyklón neboli sestavu 2, 4 nebo více paralelně řazených cyklónů [4].



Obrázek 5 Cyklón s tečným vstupem plynu[20],[21]

### 3.2 LÁTKOVÉ ODLUČOVAČE

Odlučování TZL z odpadního plynu zde probíhá při průchodu filtrační látkou. Odlučivost je závislá převážně na typu materiálu a pórovitosti, jelikož rozměr pórů částečně určuje, jak velká částice látkou projde. Dále ovšem záleží také na tloušťce filtračního média, vlastnostech materiálu a měrném zatížení [2].

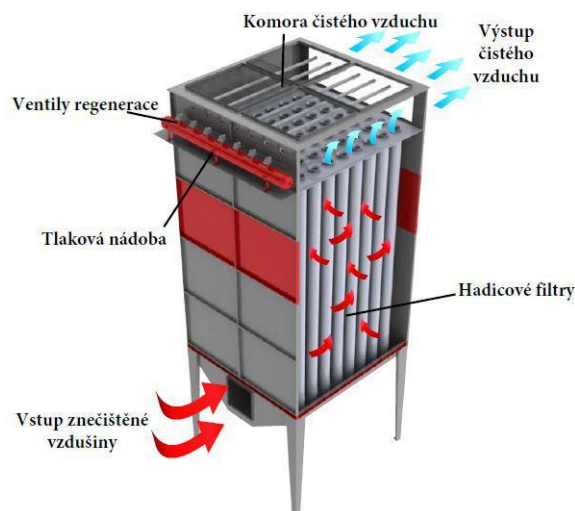
Kromě pórovitosti materiálu zajišťuje zachycení prachových částic několik dalších zároveň působících mechanismů [4]:

- Sítovací účinek – Jak bylo popsáno v předchozím odstavci, k zachycení prachu dojde díky tomu, že póry filtrační látky mají menší průměr než samotné částice.
- Impaktní účinek – Částice se zachytí jejím nárazem do filtrační přepážky.
- Difusní účinek – Částice nejmenších velikostí se zachytí v důsledku Brownova pohybu.
- Elektrostatický účinek – K usazení prachu dojde díky působení elektrostatických sil.
- Sedimentační účinek – K usazení prachu dojde díky působení gravitační síly.

Dnes se většina látkových filtračních zařízení staví jako skříňové konstrukce se stavebnicovým uspořádáním jednotlivých komor. Liší se od sebe pouze zvoleným tvarem filtrační látky. Podle tvaru je lze dělit na hadicové nebo kapsové filtry [8].

#### 3.2.1 HADICOVÝ FILTR

Látka je upravena do tvaru dlouhých hadic různých rozměrů. Z vnitřní strany jsou často vyztuženy opěrnými kroužky vsazenými dovnitř, jelikož znečištěný plyn vstupuje do hadic z vnějšku [8]. Princip odlučování, popsáný na obrázku 6, je téměř stejný jako u kapsového filtru



Obrázek 6 Hadicový filtr [22]

Hadicové filtry mohou být tkané, pletené, vrstvené nebo vpichované. V dnešní době se na výrobu hadicových filtrů používá několik různých materiálů. Kromě vlněných nebo bavlněných vláken se často využívá také polyesterových nebo ohebných skleněných vláken. Vlastnosti použitého materiálu výrazně ovlivňují účinnost filtru neboli odlučivost, životnost filtrů a také ekonomii celého provozu zařízení [17].

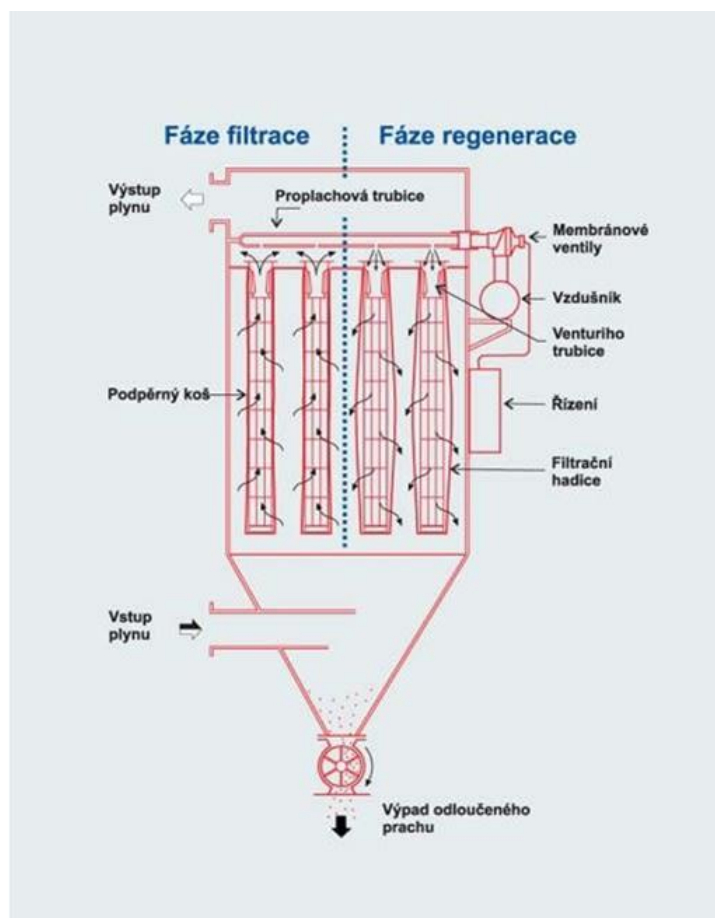
### 3.2.2 KAPSOVÝ FILTR

Látka je upravena do tvaru kapes plošných obdélníkových tvarů. Kapsové filtry mají vždy uvnitř podpěrnou drátovou konstrukci neboli branku, na kterou se látková kapsa natáhne a jako celek se poté vloží do zařízení. Průchod plynu směřuje vždy z vnější do vnitřní strany [8].

Do zařízení se kapsové filtry skládají těsně vedle sebe do řad po určitém počtu kusů v jednom bloku a do několika pater nad sebou dle potřeby. Díky jejich uspořádání a tvaru jsou ve srovnání s hadicovými filtry méně náročné na obestavěný prostor [2].

### 3.2.3 REGENERACE FILTRAČNÍHO MÉDIA

Odloučené částice se usazují na povrchu filtru a vytváří tzv. filtrační koláč, který sám o sobě vytváří filtrační plochu. Vznikající koláč sice napomáhá filtraci, ale zároveň čím větší vrstva částic se na filtru usadí, tím více roste tlaková ztráta. Tlakovou ztrátu zařízení je nutné v čase sledovat tlakovým snímačem a v momentě, kdy dosáhne určité hodnoty, filtr nárazově regenerovat. Nejčastějším způsobem regenerace je zpětný proplach nebo pulsní profuk tlakovým vzduchem. Vrstva usazeného prachu, která je od filtru oddělena regenerací volně spadne do spodní části zařízení, kde se nachází výsypka [2]. Princip je popsán také na níže uvedeném obrázku 7.



Obrázek 7 Regenerace hadicového filtru [23]



### 3.2.4 FILTRAČNÍ MATERIÁLY

Dříve používané filtrační materiály je možné rozdělit na filtrační tkaniny, zrnité vrstvy a porézní hmoty, z nichž nejčastěji byli používané filtrační tkaniny. Ty se vyráběli buďto tkaním nebo vpichováním, přičemž oba postupy měli své výhody. Například tkané textilie bylo možné použít i v případě odprašování plynu o vysoké teplotě. Obecně je vždy vhodný filtrační materiál volen převážně na základě provozních podmínek, zejména teploty. Níže, v tabulce 6, jsou pro představu uvedeny teplotní odolnosti některých materiálů [2].

*Tabulka 6 Teplotní odolnost vybraných materiálů [2]*

Materiál	Teplota [°C]
Polyvinylchlorid (PVC)	40-50
Bavlna	75-85
Vlna	80-90
Polyamid, polypropylen	75-90
Polyester	150
Teflon	200-280

Dnes převládá použití netkaných textilií. Materiálem je tedy obvykle papír, keramika, slinuté kovy a kombinované materiály jako netkané textilie s polopropustnými membránami z teflonu. Díky těmto materiálům je možné využití textilních filtrů v provozech, kde odsávaný plyn dosahuje vysoké teploty. Cena takových materiálů je často i několikanásobně vyšší, než u dříve používaných tkanin jako bavlna nebo vlna, ale zato dosahují mnohem lepší spolehlivosti a delší životnosti. Odlučivost filtračních jednotek, které využívají uvedených materiálů dosahuje až 99,9 % [4].

### 3.3 MOKRÉ ODLUČOVAČE

První mokré odlučovače vznikly přestavbou běžných suchých filtrů za účelem zvýšení spolehlivosti a odlučivosti jemných, vlhkých a lepivých prachů. Z prašníků a cyklónů, přidáním rozprašovače vody do vnitřního prostoru, vznikali takzvané skrubry (anglicky scrubber) nebo mokré vírové odlučovače. Fungují převážně díky kondenzačnímu efektu a difúzním jevům, ale důležitým doprovodným faktorem je také ulpívání jednotlivých částic na vodních kapičkách a jejich vzájemné srážky. Aby se zvýšila pravděpodobnost srážek prachových částic s kapičkami vody je nutné buď prodloužit dobu, kdy kapičky setrvávají v čistém plynu, nebo zvýšit jejich relativní rychlost vůči částicím. Účinnost těchto zařízení nejvíce ovlivňuje charakter znečišťujícího prachu, konkrétně jeho smáčivost vodou [17].

Kromě výše uvedených zařízení existuje několik dalších založených na podobném principu, jedná se například o proudové, pěnové nebo hladinové. Ačkoli jsou mokré odlučovače velmi efektivní, tak se moc často nepoužívají, protože je u nich potřeba kalového hospodářství a mohou zamrznat při nízkých teplotách. [17].



### 3.3.1 SKRUBRY

Skrubr, nebo také sprchová věž, využívá principu zachycení prachu do kapiček skrápěcí kapaliny. Ta je do prostoru vstřikována z horní části věže, případně z několika úrovní nad sebou, přičemž znečištěný plyn proudí ze spodní části, kde se nachází kromě vstupní příruby také kalová nádrž. Průchozí prostor bývá buď bez výplně nebo je doplněn rošty či žaluziemi, jak je zobrazeno na obrázku 8. Jelikož je zde velké nebezpečí koroze, jsou věže vyráběny převážně z korozivzdorných ocelí, plastů nebo mají vnitřní stěny pogumované [4].

Často se používají pouze jako předodlučovače před dalšími zařízeními, například Venturiho vírovými filtry. Sami o sobě nedosahují příliš vysoké odlučivosti, jejich význam spočívá hlavně v předčištění a ochlazení plynu. U sprchových věží se cíleně navrhuje malá rychlost proudění, a to od 1 do 1,5 m/s. Při vyšších rychlostech vzniká nebezpečí, že kapičky vody strhne proud plynu, místo aby odpadali volně směrem dolů do kalové nádrže [8].



Obrázek 8 3D model skrubru a vizualizace použití v praxi [24]

### 3.3.2 PĚNOVÉ ODLUČOVAČE

Pěnový odlučovač, nebo také pěnový skrubr, je jedním z nejúčinnějších mokrých odlučovačů. Díky tomu, že kromě prachu spolehlivě zachycují také plynné znečišťující složky, jsou ideální pro použití v chemickém průmyslu. Zpravidla jsou konstruovány do několika pater, přičemž každé patro se skládá z perforovaného plechu nebo roštu s mezerami 5 až 7 mm. Skrápěcí kapalinou je nejčastěji voda, která se přivádí na nejvyšší patro, odkud může díky rozváděcím přepadovým žlabům odtékat dolů do spodních pater [4].

Důležitým faktorem je zde rychlost proudění. Ve volném průřezu zařízení mezi jednotlivými patry je rychlost plynu navržena maximálně na 2,2 m/s, aby nedocházelo k úletům kapek vody do výfukového potrubí. Rychlost plynu však několikanásobně vzroste při průchodu otvory každého patra, čímž se vytváří několika centimetrová vrstva vodní tříště, která vypadá podobně jako pěna. Tato vytvořená vrstva s velkým mezifázovým povrchem zvyšuje pravděpodobnost nárazu prachové částice do kapky, což výrazně zvyšuje odlučivost. Díky tomu pěnové skrubry dosahují až 99 % odlučivosti částic s velikostí nad 5  $\mu\text{m}$  [4].

### 3.3.3 HLADINOVÉ ODLUČOVAČE

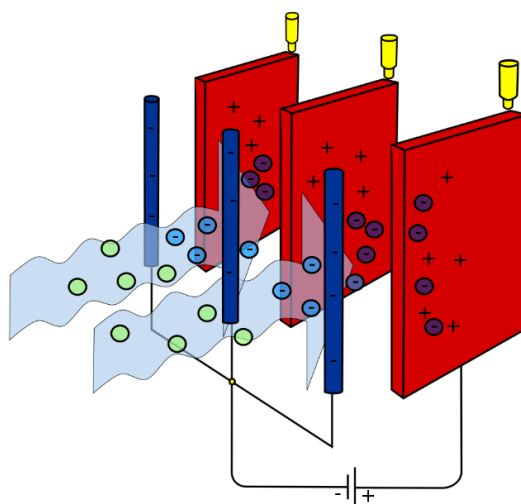
Existuje několik typů hladinových odlučovačů lišící se hlavně směrem, kterým je přiváděn znečištěný plyn a tvarem šterbiny, kterou protéká. Všechny typy těchto zařízení fungují na obdobném principu, který spočívá v tom, že plyn je přiveden na hladinu kapaliny a prochází vysokou rychlostí šterbinou umístěnou mezi hladinou a naváděcími lopatkami. Proudící plyn sebou strhává kapalinu a vynáší ji do prostoru mezi naváděcími a usměrňujícími lopatkami, kde dochází k mísení prachových částic a vody. Zbylé částice, které se při tomto procesu neseparují, jsou odvedeny průchodem vzniklou vodní clonou na výstupní hraně lopatek [2].

Značnou výhodou je vysoká odlučivost, která pro běžný například slévárenský prach, dosahuje hodnot i vyšších než 99 %. Další výhodou je jejich kompaktnost, součástí zařízení je samotná odprašovací část, ventilátor i kalové hospodářství. Díky tomu jsou i dnes relativně rozšířené [8].

### 3.4 ELEKTROSTATICKÉ ODLUČOVAČE

Elektrostatické odlučovače fungují díky působení přitažlivých sil mezi elektricky nabitými částicemi a srážecí elektrodou nabitou opačným nábojem. Aby tento proces fungoval, částice se před odloučením musí nejdříve nabít elektrickým nábojem. To je zajištěno nabíjecí nebo srážecí elektrodou o malé ploše. Nabité částice jsou poté při průchodu odlučovačem přitaženy velkoplošnými sběrnými elektrodami s kladným nábojem. Princip je blíže znázorněn na obrázku 9. Usazený prach na srážecích elektrodách je nejčastěji odstraněn oklepáváním pomocí speciálních kladiv. Uvolněný prach odpadá směrem dolů do výsypky [2].

Na odlučivost má největší vliv doba, kterou se částice zdržují v aktivní zóně, tedy v elektrickém poli mezi elektrodami. Dále také záleží na velikosti elektrostatické síly, velikosti částic a na koncentraci prachu. Ideální rychlost proudění plynu v odlučovači je 1 až 2 m/s. Tyto zařízení jsou zpravidla velmi rozměrné [4].



Obrázek 9 Princip elektrostatického odlučovače [25]

## 4 NÁVRH FILTRAČNÍ JEDNOTKY

Tato kapitola bude věnována návrhu filtrační jednotky pro slévárenský průmysl, konkrétně pro čistírnu odlitků neboli cídírnu. Návrh byl proveden ve spolupráci s firmou zabývající se průmyslovou filtrací a záchytem TZL PRO-FILTR BRNO s.r.o., přičemž bylo využito interních dokumentů, tabulek a podkladů pro výpočty. Uvedené zadání vychází ze skutečného projektu, který tato firma realizovala.

Každá poptávka v praxi obvykle zahrnuje výpis jednotlivých zdrojů znečištění, požadované objemy odsávané vzdušiny a požadovanou výstupní koncentraci TZL.

Objem odsávané vzdušiny pro každý stroj definuje výrobce nebo se volí na základě zkušeností z obdobných provozů. Stejným způsobem se postupuje při určení rychlosti proudění odsávaného plynu.

### 4.1 ZADÁNÍ FILTRAČNÍ JEDNOTKY

Zdroje znečištění jsou v tomto případě jednotlivé pracoviště čistírenských operací, na kterých se provádí odstranění keramické skořepiny z odlitků (vytloukání), tryskání odlitků v tryskacích zařízeních, jejich odřezání od vtokového kůlu, broušení a finální tryskání, při kterém je odlitkům dán konečný vzhled. Všechny stroje, níže vypsány v tabulce 7, budou odsávány jedním filtračním zařízením. Požadované odsávané objemy jsou uvažovány při normálních podmínkách (tlak 101,3 kPa a teplota 0 °C). Nosným médiem je vzduch o uvažované relativní vlhkosti 50 %.

Tabulka 7 Výpis odsávaných zařízení

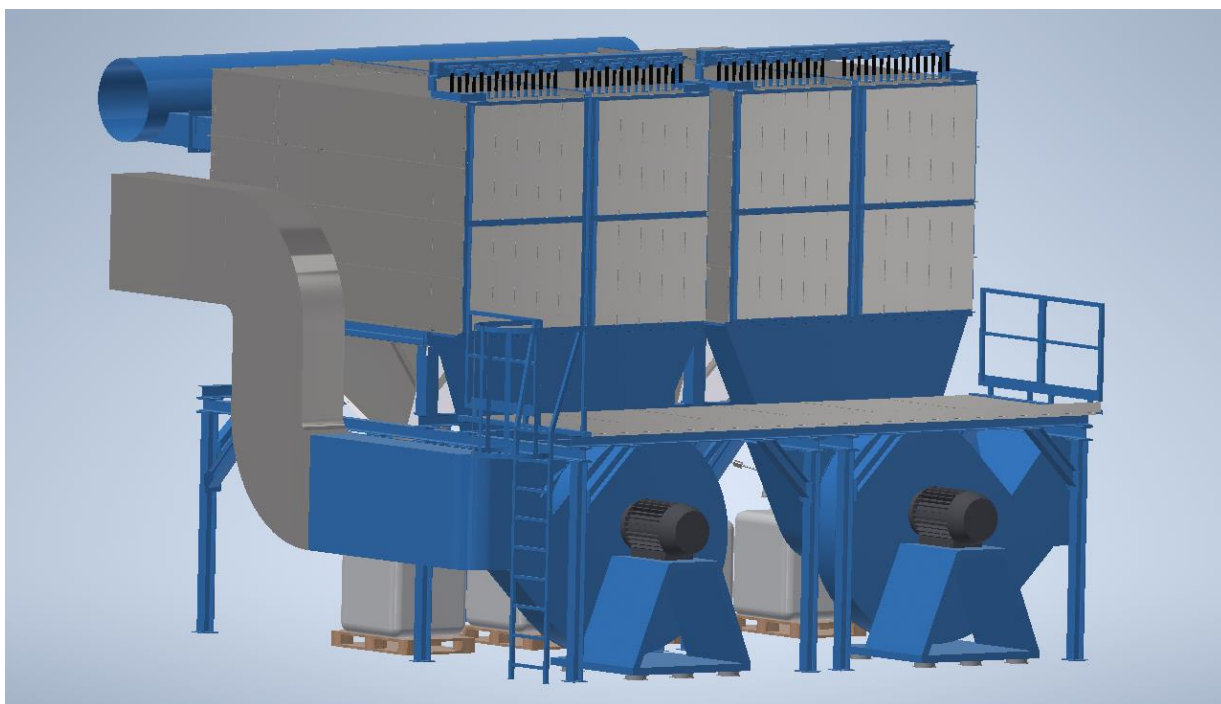
Zdroj znečištění	Počet ks	Odsávání [m <sup>3</sup> /h]
Vytloukací stroj	3	3 000
Bubnový tryskač	1	5 000
Závěsný komorový tryskač	1	3 600
Závěsný komorový tryskač	2	6 000
Brousící stroj	1	3 000
Rozbrušovačka odlitků	1	1 500
Pásová bruska	3	1 500
Bubnový tryskač	2	2 000
Ruční tlaková tryskací kabina	1	2 000
Bubnová tlaková tryskací kabina	1	2 000
		Celkem: 46 600

- Požadovaný objem odsávané vzdušiny: 46 600 m<sup>3</sup>/h
- Garantované emise TZL na výstupu zpět do vnitřního prostředí: 0,5 mg/m<sup>3</sup>
- Specifický emisní limit TZL dle krajského úřadu (viz příloha 1): 50 mg/m<sup>3</sup>

## 4.2 NÁVRH KONCEPCE ZAŘÍZENÍ

Prach, který vzniká při broušení, je suchý a obsahuje velmi jemné, ale i hrubé částice prachu, které způsobují abrazivní opotřebení sacího potrubí odlučovacího zařízení. Aby se prodloužila životnost tak se zvolilo tlustostěnné svařované potrubí spojené pomocí rozebíratelných šroubových spojů, což umožňuje snadný servis jednotlivých částí potrubí trasy.

Vzhledem k charakteru brusného prachu byla zvolena metoda odprašování suchým filtrem s využitím látkového filtračního média v podobě kapes vyrobených z netkané textilie PES s plošnou hmotností 550 g/m<sup>2</sup>. Dle nabídky firmy PRO-FILTR se jedná o filtrační zařízení typu JET. Při výpočtech a návrhu filtru je nutné dbát na to, že jednotlivé kapsy s výztužnou brankou se skládají do řad od 10 do 15 kusů vedle sebe a do několika pater nad sebou, podle zástavbového prostoru. Výsledné uspořádání filtrační jednotky lze vidět na obrázku 10 níže.



Obrázek 10 Filtrační zařízení JET\_2\_15\_4\_2\_2

### 4.2.1 VENTILÁTOR

Jelikož je stanoven celkový špičkový objem vzdušniny, prvním krokem je návrh vhodného ventilátoru, který bude schopen daný objem vzduchu odsávat. Vzhledem k tomu, že v tomto případě je celkový objem značně vysoký, je nutné ho rozdělit a použít dva ventilátory. Aby bylo dosaženo co nejlepší životnosti zařízení, volí se celkový objem o něco vyšší, než je vypočtené maximum. S ohledem na tyto skutečnosti byl navržen odsávaný objem 28 000 m<sup>3</sup>/hod (7,77 m<sup>3</sup>/s) na jeden ventilátor. K dimenzování ventilátorů byl použit výpočtový vzorec z podkladů firmy PRO-FILTR. Celkový tlak ventilátoru byl vzhledem k vřazeným odporům odhadnutý na 5 500 Pa. Níže je uveden výpočet výkonu ventilátoru.

$$P = \frac{Q \cdot \Delta p}{\eta} = \frac{7,77 \cdot 5\,500}{0,75} = 56\,980 \text{ W} \cong 57 \text{ kW} \quad (2)$$

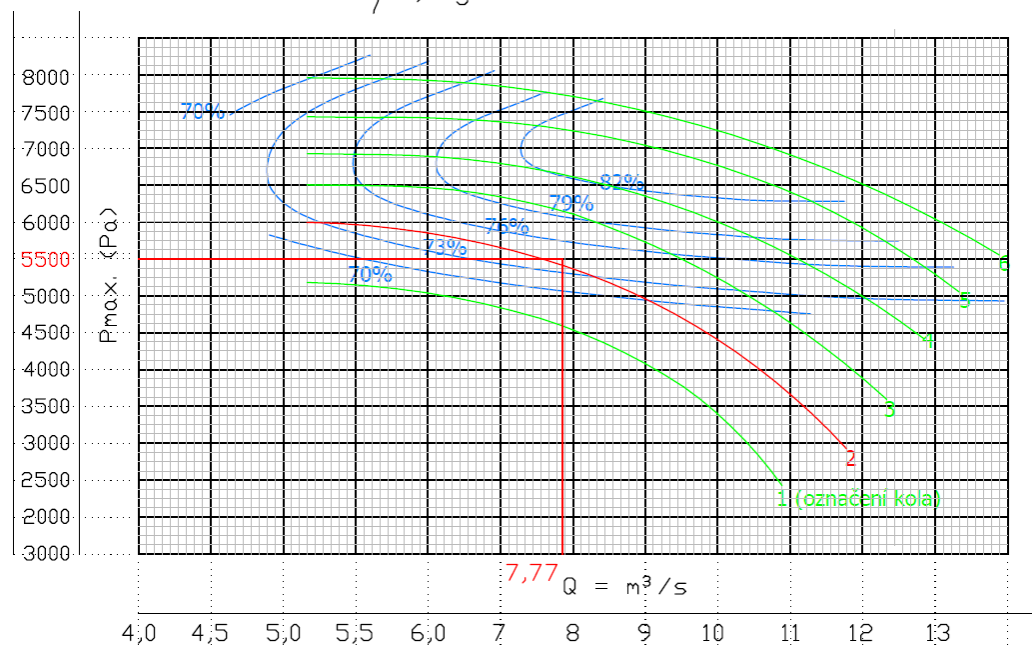
Kde použité symboly mají následující význam:

$P$ [W]	výkon ventilátoru,
$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	objem odsávaného vzduchu,
$\eta$ [-]	účinnost ventilátoru.

Vypočtený výkon se porovná s tabulkovými hodnotami dodávaných elektromotorů a zvolí se nejbližší vyšší hodnota, v zadaném případě výsledku nejlépe odpovídá motor s výkonem 75 kW. Na obrázku 11 je červeně zvýrazněna výkonová křivka zvoleného ventilátoru o celkovém tlaku 5 500 Pa (svislá osa) a odsávanému objemu 7,77 m<sup>3</sup>/s (vodorovná osa). Křivka byla převzata z firemních dokumentů. Výše použitý výpočtový vzorec počítá výkon na základě předpokladu, že frekvence elektromotoru je 50 Hz. Pro případ, že není využito všech pracovišť a není tedy nutno od nich odsávat vzduch, větev je možné uzavřít klapkou instalovanou v potrubí. Ventilátory jsou ovšem navrženy tak, aby odsávaly požadovaný objem, který odpovídá stavu, kdy jsou všechna pracoviště využita a klapky jsou otevřeny. Z toho důvodu je nutné jejich výkon v čase měnit, k čemuž slouží frekvenční měnič. Kvůli pochozí plošině, umístěné nad ventilátory, bylo nutné je natočit o 45°.

CHARAKTERISTIKA VENTILÁTORU HPF1250

75kW, 1 460ot/min, 50 Hz  $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$



Obrázek 11 Výkonová křivka ventilátoru HPF 1250

## 4.2.2 FILTRAČNÍ PLOCHA

Druhým krokem, poté co je určen maximální odsávaný objem, je návrh filtrační plochy a určení rozložení filtračních kapes do řad a pater. Vzhledem k zástavbovému prostoru byla stanovena maximální výška zařízení na 6 000 mm, což odpovídá maximálně čtyřpatrovému provedení filtru JET včetně nosné ocelové konstrukce. Šířka a hloubka zařízení nebyla zásadně omezena. Níže je uveden výpočet filtrační plochy. Byl použit vzorec z interních podkladů firmy.

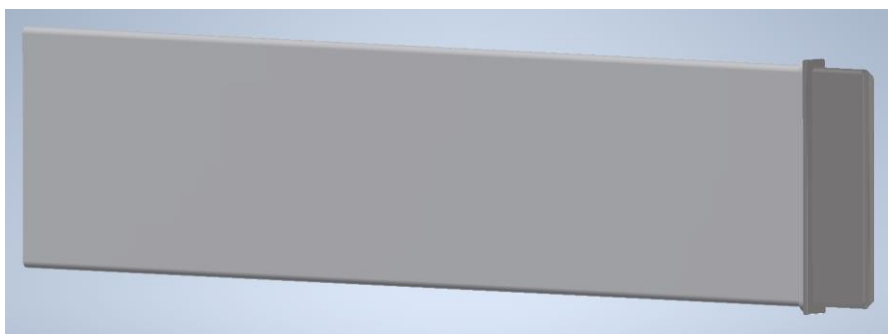
$$S_c = \frac{Q}{k} = \frac{\frac{2 \cdot 28\,000}{60}}{2} = 466,67 \text{ m}^2 \quad (3)$$

Kde použité symboly mají následující význam:

$S_c$  [m<sup>2</sup>] celková filtrační plocha,

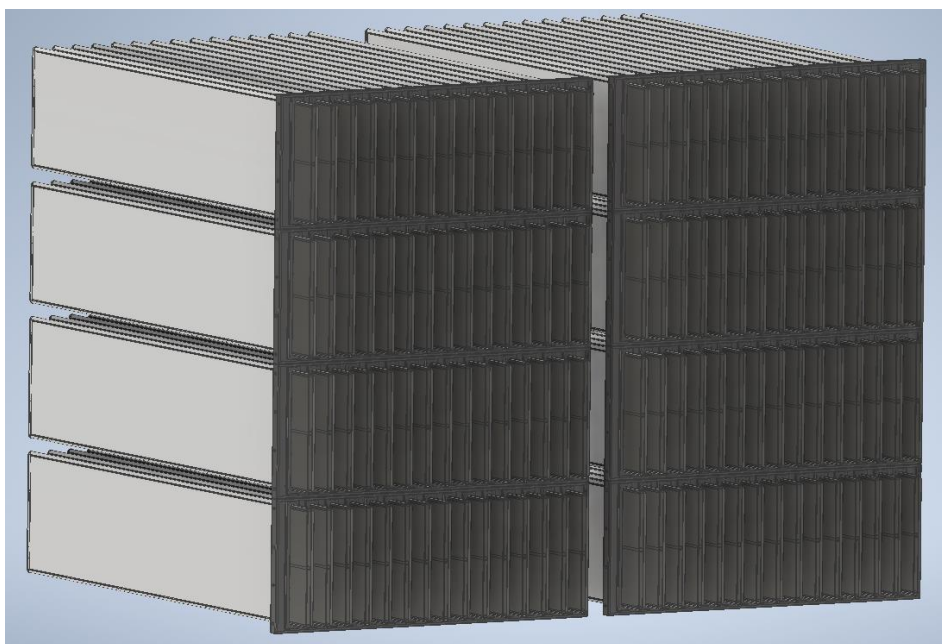
$k$  [m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/min] koeficient zatížení filtrační plochy (pro odsávání brusného prachu je doporučena hodnota 1,5 až 2 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/min dle zkušeností firmy z obdobných provozů).

Filtrační kapsy se dodávají v různých rozměrech, vzhledem k zástavbovému prostoru byly zvoleny kapsy dlouhé 2 000 mm a široké 500 mm, viz obrázek 12.



*Obrázek 12 Filtrační kapsa nasazená na nosné brance*

Celková plocha zvolené kapsy je 2 m<sup>2</sup>. Minimální nutná filtrační plocha byla vypočtena na 466,67 m<sup>2</sup>. Po několika iteracích bylo navrženo uspořádání 15 kapes v jedné řadě, 4 patra nad sebou, 2 bloky vedle sebe v jedné jednotce a celkově 2 jednotky, z čehož vychází označení 15\_4\_2\_2. Zobrazení uspořádání je znázorněno na následujícím obrázku 13.



*Obrázek 13 Zobrazení uspořádání kapes v jedné filtrační jednotce*

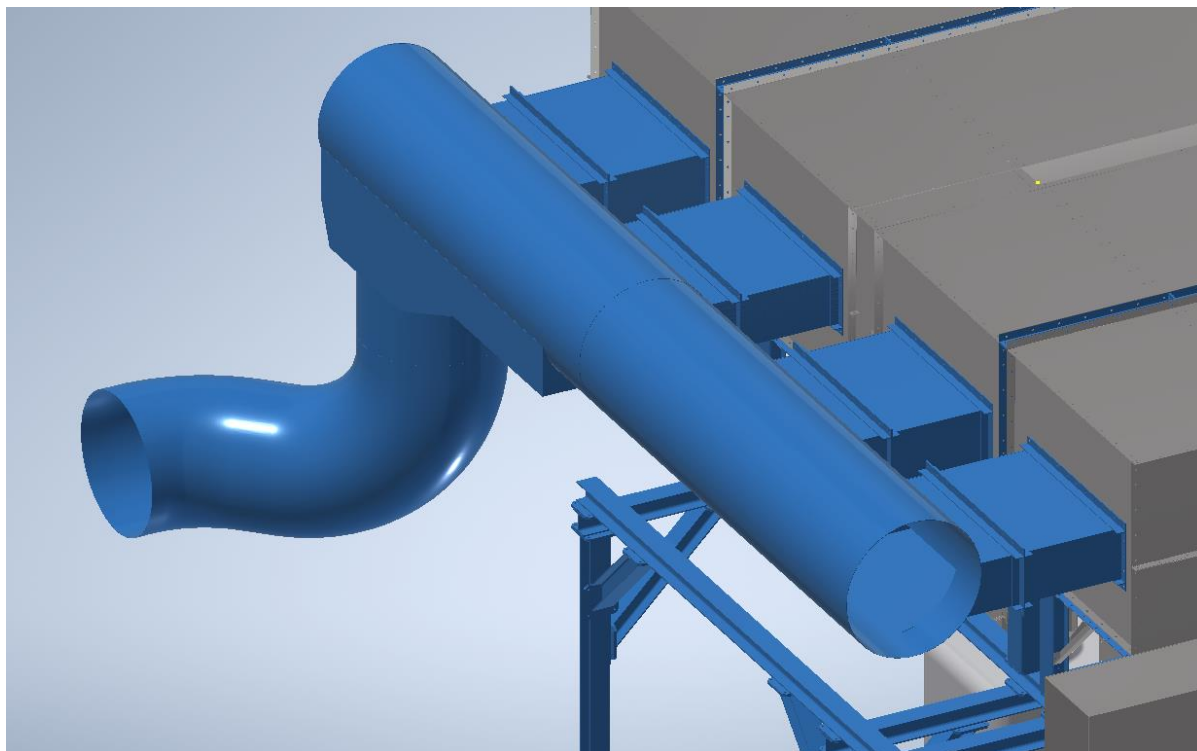


Zvolené uspořádání dohromady dává lehce naddimenzovanou celkovou filtrační plochu 480 m<sup>2</sup>. Pro kontrolu, jestli výsledná hodnota odpovídá doporučenému intervalu, se provede zpětný výpočet využívající stejného vzorce, kde tentokrát bude neznámý koeficient zatížení filtrační plochy.

$$k = \frac{Q}{S_c} = \frac{\frac{2 \cdot 28\,000}{60}}{480} = 1,94 \quad (4)$$

#### 4.2.3 POTRUBÍ

Kromě charakteru odsávaného prachu, kvůli kterému bylo zvoleno tlustostěnné svařované potrubí, je dalším důležitým parametrem rychlost proudění. V případě, že je rychlost v potrubí větší než 18 m/s, abrazivní účinky prachu vůči potrubí jsou mnohem větší. Na druhou stranu, pokud je rychlost výrazně nižší než 14 m/s, prach se v potrubí usazuje. Jak lze vidět na obrázku 14, s ohledem na rozmístění pracovišť byli navrženy celkem dvě trasy sacího potrubí, které se setkávají a spojují těsně před vstupem do filtrační jednotky.



*Obrázek 14 Detailní pohled na sací potrubí*

Na jednu sací trasu vychází odsávaný objem na 28 000 m<sup>3</sup>/hod. Pro dimenzování potrubí byl použitý výpočtový vzorec z interních dokumentů firmy. Ideální rychlost odpovídající doporučenému intervalu 14 až 18 m/s vychází při použití standardizovaného průměru potrubí 800 mm. Stejným způsobem se dále dimenzují odbočky potrubí k jednotlivým pracovištím. Níže je uveden příklad výpočtu.

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\pi \cdot r^2} = \frac{7,77}{\pi \cdot 0,4^2} = 15,46 \frac{m}{s} \quad (5)$$

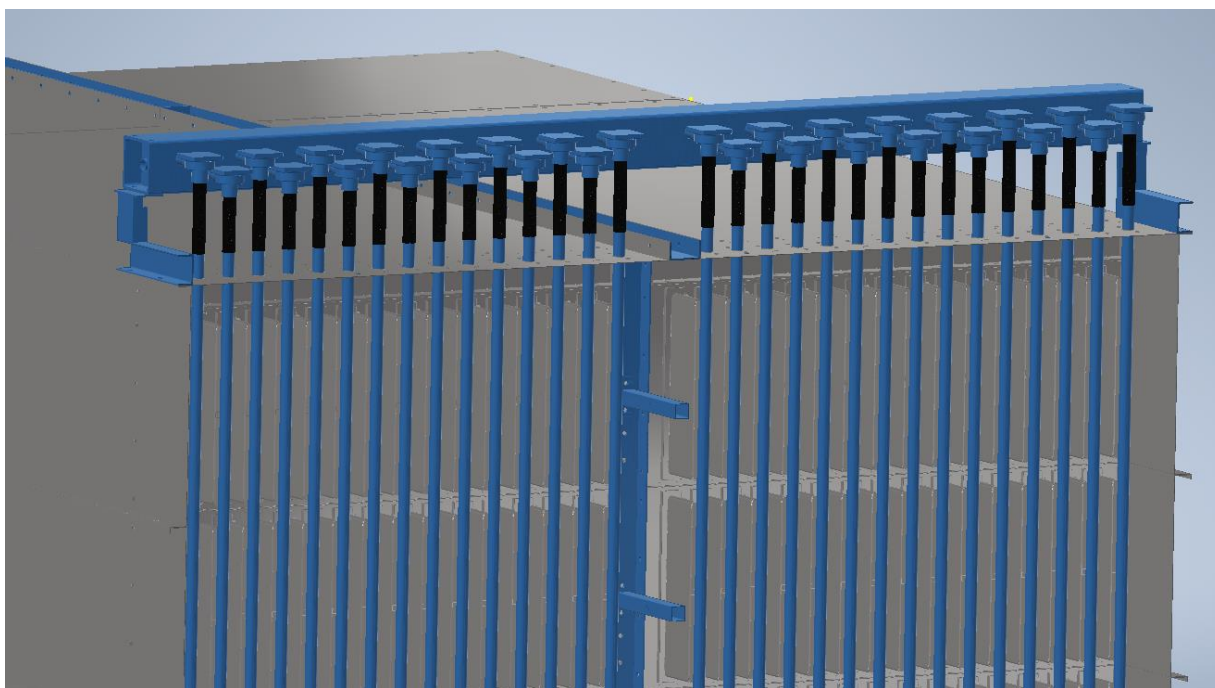
Kde použité symboly mají následující význam:

$r$  [m]              poloměr potrubí,

$S$  [m<sup>2</sup>]            průřez potrubí.

#### 4.2.4 REGENERACE

Jako způsob regenerace filtračního média byl navržen pulzní proplach tlakovým vzduchem. Jak lze vidět na obrázku 15, v horní části filtračního zařízení se nachází zásobník stlačeného vzduchu o tlaku 0,6 až 0,7 MPa, na který jsou napojené dvoucestné ventily ovládané inteligentní řídicí jednotkou. V momentě, kdy je ventil otevřen, tlakový vzduch pokračuje dál do ofukové trubky, která po celé své délce má vyvrtané otvory směřující do vnitřního prostoru filtrační kapsy. Z vnější plochy kapsy je tímto způsobem odstraněna přebytečná vrstva usazeného prachu. Jelikož určitá vrstva prachu (filtrační koláč) napomáhá odlučovacímu procesu, není žádoucí, aby byla odstraněna příliš brzo. Z toho důvodu řídicí jednotka v čase sleduje hodnotu tlakové ztráty, která plynule roste se zvětšující se vrstvou usazeného prachu a podle toho upravuje časové intervaly ofouknutí tlakovým vzduchem.



*Obrázek 15 Ofukové trubky napojené na zásobník stlačeného vzduchu*

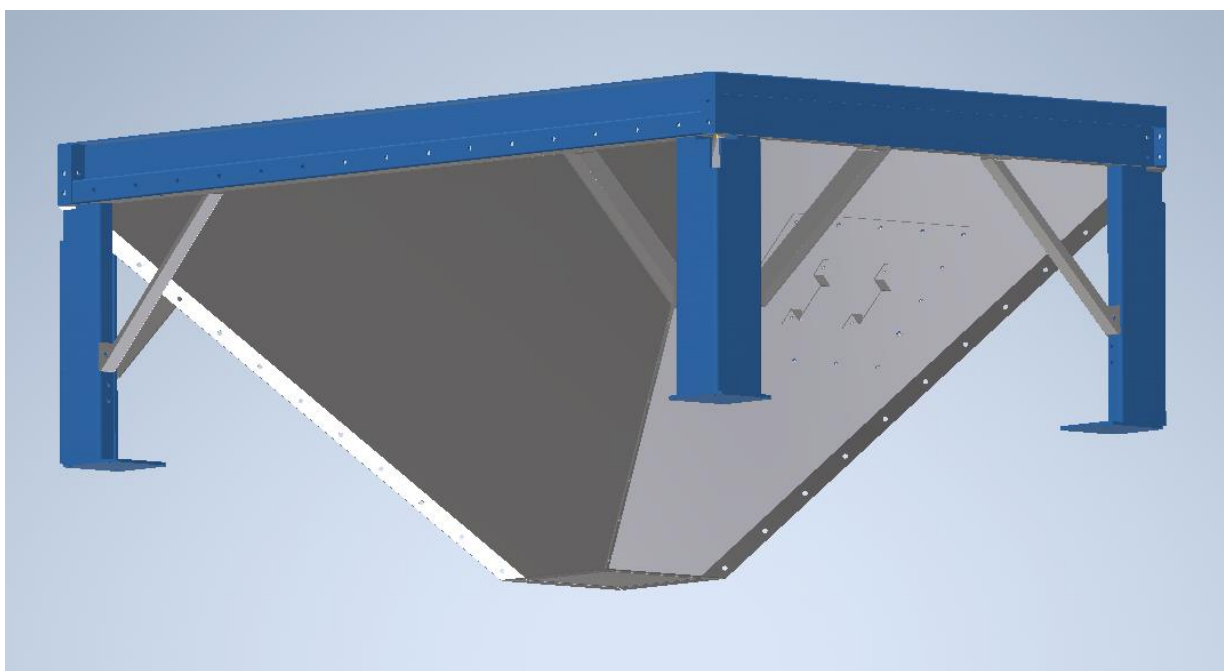
#### 4.3 DALŠÍ FUNKČNÍ PRVKY

Na tomto zařízení bylo dále navrženo několik inovativních konstrukčních prvků a úprav, které měli usnadnit servis, prodloužit životnost jak jednotlivých částí zařízení, tak filtračního média a také v rámci možností snížit ekonomické náklady na výrobu. Z toho důvodu je téměř celé zařízení poskládané z profilovaných pozinkovaných plechů spojených pomocí šroubů. Cílem bylo co nejvíce omezit součásti dílensky vyráběné, svařované a následně lakované.



#### 4.3.1 SKLÁDANÁ VÝSYPKA

Dříve byla výsypka vyráběna svařováním jako celek. Toto řešení značně komplikovalo dopravu a samotnou montáž, případně ustavení na místo. Kvůli technologii svařování a velkým rozměrům musela být vyráběna z tlustšího materiálu, což mělo také negativní vliv na hmotnost. Jelikož se nově navržená výsypka skládá z ohýbaných pozinkovaných plechů, bylo možné ji vyrábět z tenčího materiálu, přičemž si konstrukce zachovala tuhost, snížila hmotnost a zlepšila se odolnost vůči korozi a nepříznivým okolním vlivům. Výhodou je také skutečnost, že nyní je možné sestavu dopravit na místo rozebranou a poskládat ji až na určeném místě. Koncept obvodového rámu, výsypky i noh lze na míru upravit pro celou řadu dalších zařízení libovolných rozměrů dle potřeby. Na čele výsypky se nachází odnímatelný kontrolní otvor, sloužící ke kontrole a servisu jednotky. Pro představu je výsypka zobrazena níže na obrázku 16.

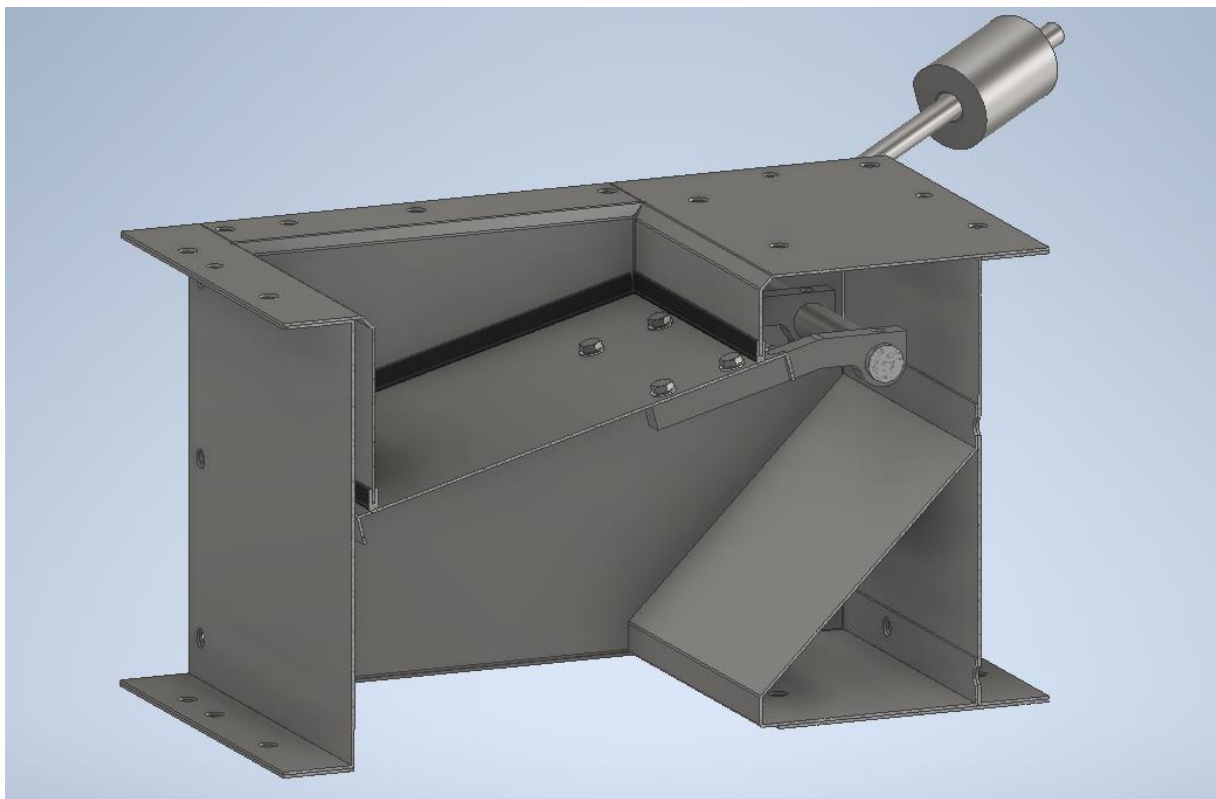


Obrázek 16 Skládaná výsypka

#### 4.3.2 SAMOČINNÁ GRAVITAČNÍ Klapka

Jednou z variant vyprazdňovacích systémů je samočinná gravitační klapka. Montuje se na spodní část výsypky a zajišťuje odvedení odloučeného prachu do sběrného kontejneru nebo pytle. Z důvodu jednoduchosti montáže a snadného servisu byla její konstrukce opět navržena jako stavebnice z ohýbaných pozinkovaných plechů, viz obrázek 17. Funguje na jednoduchém principu. Při provozu, kdy filtr kontinuálně odsává vzduch je uvnitř zařízení podtlak, který kromě protizávaží drží klapku v zavřené poloze dotlačenou na dosedací plochu a těsnění. Na povrchu klapky se začne shromažďovat odloučený prach a v momentě, kdy vrstva prachu dosáhne určité hmotnosti, se klapka otevře a vyrovnáním tlaků je vymrštnuta do oklepové části. Tím, že narazí do přepážky, z ní usazený prach odpadne směrem dolů. Aby při otevření klapky nedošlo ke zpětnému nasátí vzduchu a prachu z kontejneru, montují se gravitační klapky v páru pod sebou. Mezitím, než se druhá klapka stihne otevřít, se ta první již díky protizávaží opět zavře a je přisáta podtlakem. Druhá klapka se otevře samotnou hmotností prachu a následně se opět zavře díky protizávaží, čímž je celý cyklus ukončen.

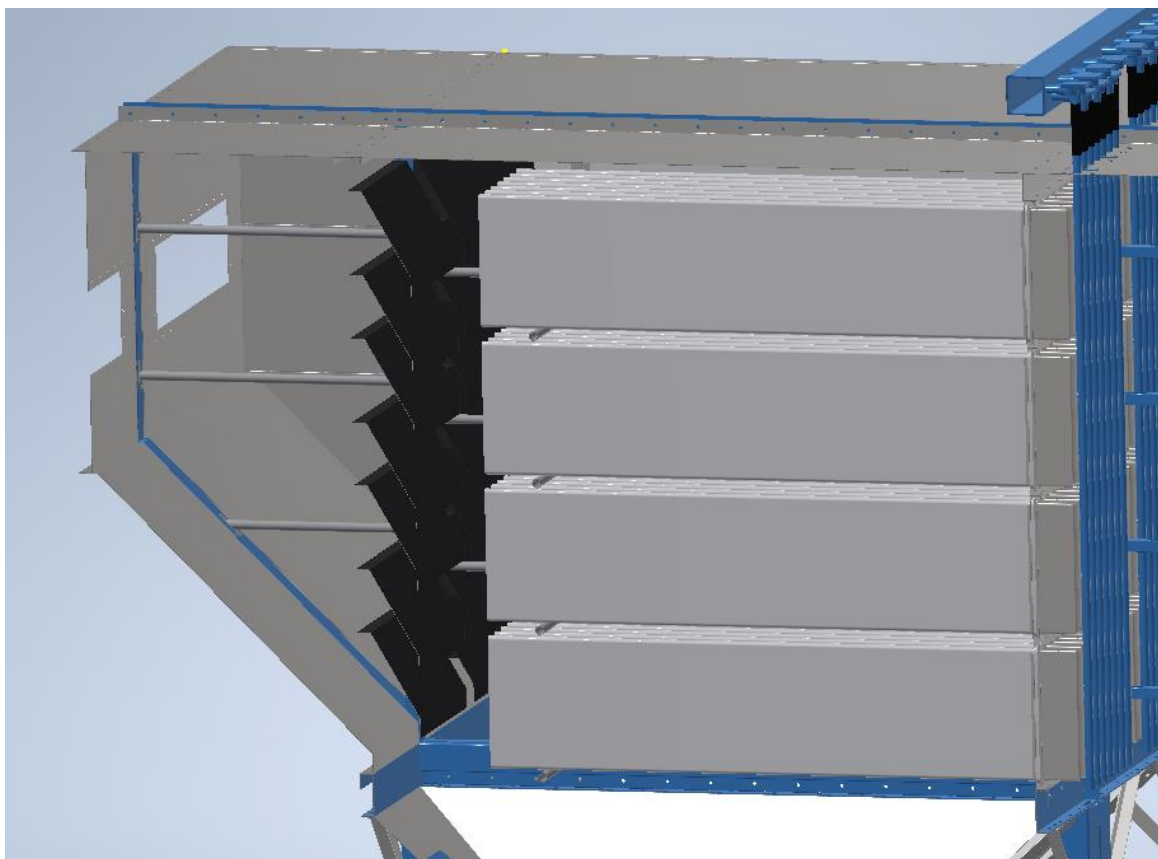
Značnou výhodou této klapky je její samočinnost, tudíž ji není potřeba ovládat nebo pohánět. Svoji konstrukcí je velmi spolehlivá. Nevýhodou může být, že není možné ji použít v případě, kdy je prach lepivý nebo moc jemný.



*Obrázek 17 Gravitační klapka*

#### **4.3.3 PŘECHODOVÁ KOMORA**

V zájmu zlepšení účinnosti a životnosti filtračního média byla do zařízení před hlavní odlučovací komoru umístěna takzvaná přechodová komora, která kombinuje funkci mechanického gravitačního a žaluziového odlučovače. Tato komora se v zařízení nachází hned za vstupním potrubím. Tím, že se za vstupní přírubou komora okamžitě rozšiřuje do několikanásobných rozměrů, rychlost proudění zde značně poklesne a největší částice odpadnou směrem dolů do výsypky svou vlastní hmotností nebo jsou do tohoto směru usměrněny umístěnými žaluziemi. Ty jsou do komory instalovány pomocí prodloužených šroubů mezi výztužné rámy samotného zařízení. Žaluzie jsou vyrobeny z pozinkovaného plechu, a kromě toho, že usměrňují plyn a napomáhají gravitačnímu odloučení, také zabráňují potenciálním rychle letícím těžkým částicím narazit přímo do filtrační kapsy, kterou by mohli protrhnout nebo poškodit. Výhodou je, že díky způsobu jejich montáže, není nutné běžnou konstrukci zařízení nijak měnit a je možné je aplikovat dle potřeby i do dříve postavených filtrů. Pro přehlednost jsou níže na obrázku 18 žaluzie zobrazeny černě.



*Obrázek 18 Přejížděvací komora s instalovanými žaluziemi*

## 5 MĚŘENÍ

Po realizaci projektu bylo navržené filtrační zařízení podrobena měření koncentrací TZL autorizovanou laboratoří Detekta s.r.o., Franzova 63, Brno. Měření bylo provedeno na hlavní části výfukového potrubí, které směřuje zpět do vnitřního prostoru haly. Příruba určená k autorizovanému měření emisí, umístěna na potrubí, má průměr 315 mm. Během měření probíhal na pracovištích běžný režim. Konkrétně byli nárazově v provozu dva závěsné tryskače, tryskácká kabina, pásová bruska, brousící stroj a vytloukač odlitků. V následující tabulce 8 jsou uvedeny výsledky měření, celý protokol je k dispozici v příloze 1.

Tabulka 8 Výsledky autorizovaného měření

<b>vzorkovací profil:</b>				
plocha	[m <sup>2</sup> ]	0,0755		
počet měřících os profilu		2		
počet měřících bodů	[n]	4		
<b>Odběr číslo</b>		1	2	3
<b>Datum</b>		13.4.2021	13.4.2021	13.4.2021
<b>Začátek odběru</b>		13:15	13:55	14:40
<b>Vlastnosti plynu v potrubí</b>				
teplota	[°C]	22,7	22,8	22,8
tlak atmosférický	[Pa]	99 770	99 770	99 770
tlakový rozdíl	[Pa]	128	125	132
hustota	[kg/m <sup>3</sup> ]	1,1497	1,1493	1,1494
fiktivní vlhkost	[kg/m <sup>3</sup> ]	0,0057	0,0057	0,0057
rychlost průměrná <sub>PM</sub>	[m/s]	15,61	15,94	15,77
rychlost průměrná <sub>NP</sub>	[m/s]	14,21	14,50	14,35
průtok Q <sub>V PM</sub>	[m <sup>3</sup> /hod]	4240	4331	4286
průtok Q <sub>V NP</sub>	[m <sup>3</sup> /hod]	3860	3941	3900
průtok Q <sub>S NP</sub>	[m <sup>3</sup> /hod]	3833	3913	3873
<b>průměr Q<sub>S NP</sub></b>	<b>[m<sup>3</sup>/hod]</b>	<b>3873</b>		
<b>Odběrové podmínky</b>				
tryska sondy - průměr	[mm]	8,0	8,0	8,0
prošlý objem	[m <sup>3</sup> ]	1,3365	1,3709	1,3806
čas	[min]	32	32	32
<b>Prošlý objem za NP suchý plyn</b>	<b>[m<sup>3</sup>]</b>	<b>1,2503</b>	<b>1,2709</b>	<b>1,2779</b>
<b>Přírůstek hm. filtru</b>	<b>[mg]</b>	<b>0,4</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>
<b>Konc. TZL za NP vztaženy na suchý plyn</b>	<b>[mg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>0,3</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>
<b>Průměr</b>		<b>0,4</b>		
Hodnota slepého vzorku	[mg/vzorek]	< 0,2		

Výsledky jsou uvedeny za normálních stavových podmínek (tlak 101,3 kPa a teplota 0 °C). Specifický emisní limit byl dle rozhodnutí krajského úřadu stanoven na maximální koncentraci TZL do 50 mg/m<sup>3</sup> (viz příloha 1), zatímco firma PRO-FILTR garantuje maximální koncentraci 0,5 mg/m<sup>3</sup> na výduchu zpět do vnitřního prostoru haly. Část výfukového potrubí směřuje také do venkovního prostoru, kde firma udává maximální koncentraci do 5 mg/m<sup>3</sup>. Specifický limit i garance firmy byli dle měření splněny.

## ZÁVĚR

Cílem práce bylo obeznámit čtenáře s problematikou znečišťování ovzduší tuhými znečišťujícími látkami a navrhnout filtrační jednotku pro reálný zdroj znečištění v podobě čistírny odlitků. Pro pochopení tématu bylo nutné nejdříve tuhé znečišťující látky obecně popsat a představit jejich vlastnosti důležité pro návrh příslušného odlučovače. Na uvedených vlastnostech závisí nejen volba samotné metody odlučování, ale také návrh mnoha konstrukčních prvků, které jsou nedílnou součástí zařízení. Byli zde popsány vlastnosti, které jsou nejdůležitější pro správný chod zařízení v reálných provozech.

Důležitým úkolem teoretické části práce bylo také stručně popsat platnou legislativu v České republice, zabývající se ochranou ovzduší. Lze si povšimnout, že obecné emisní limity určené zákonem jsou nastaveny poměrně vysoké, je nutné brát v potaz, že se jedná pouze o obecné limity. Pro většinu provozovaných zdrojů znečištění stanovuje krajský úřad specifický emisní limit, který je zpravidla řádově nižší než obecný.

Teoretická část končí popisem moderních i historických metod odstraňování TZL. Některé uvedené metody jsou ve své podstatě velmi složité a doprovází je celá řada výpočtů. Jelikož záměrem této kapitoly bylo především pochopení principu jednotlivých metod, jejich popis byl v některých případech zjednodušen.

Na teorii navazuje praktický návrh filtrační jednotky pro zadaný případ. Návrh byl proveden pod společností PRO-FILTR BRNO s.r.o.. Při dimenzování a výpočtech jednotlivých částí zařízení bylo využito interních dokumentů a podkladů, přičemž výsledky byli konzultováni s vedením firmy. Vzhledem k rozsáhlosti projektu byli některé části zařízení navrženy a konstruovány ve spolupráci s dalšími pracovníky této firmy, jedná se například o nosnou ocelovou konstrukci a pochozí plošinu. Moje vlastní práce na tomto projektu byla zaměřena zejména na návrh jednotlivých částí zařízení uvedených v práci, včetně jejich vymodelování a vytvoření výkresové dokumentace. Výkresy nejsou součástí práce z důvodů autorských práv. Jelikož zákazník požadoval vrácení odsávané vzdušnině zpět do vnitřního prostoru haly, kde se nachází jednotlivá pracoviště, byl při návrhu kladen důraz zejména na vysokou odlučivost a dále na dlouhou životnost a hospodárnost provozu.

Na závěr byla navržená filtrační jednotka podrobena autorizovanému měření emisí TZL, které provedla laboratoř Detekta s.r.o.. Výsledky měření odpovídaly nejen stanovenému specifickému limitu, ale také mnohem přísnějšímu limitu, který pro tento případ garantovala firma PRO-FILTR.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] *Graf-Emise základních znečišťujících látek do ovzduší v České republice* [online]. [vid. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/graf-emise-zakladnich-znecistujících-latek-do-ovzdusi-v-ceske-republice>
- [2] VEJVODA, Josef, Pavel MACHAČ a Petr BURYAN. *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2003. ISBN 978-80-7080-517-6.
- [3] HERČÍK, Miloslav. *Ochrana životního prostředí a legislativa*. Ostrava: Vysoká škola podnikání, 2004. ISBN 978-80-86764-05-4.
- [4] RICHTER, Miroslav. *Technologie ochrany životního prostředí. Část II, Část II.*. Ústí nad Labem: Fakulta životního prostředí UJEP, 2004. ISBN 978-80-7044-585-3.
- [5] OBROUČKA, Karel. *Ochrana ovzduší I.: (zdroje a látky znečišťující ovzduší)*. Ostrava: Vysoká škola podnikání, 2003. ISBN 978-80-86764-00-9.
- [6] *Kvalita vzduchu v uzavřených místnostech - 5. Co jsou PM částice? | Automatizace.HW.cz* [online]. [vid. 2021-05-11]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/kvalita-vzduchu-v-uzavrenych-mistnostech-5-co-jsou-pm-castice.html>
- [7] GRUHN, Günter. *Chemické inženýrství oborové encyklopedie*. 1990. ISBN 978-80-03-00183-5.
- [8] ŠTORCH, Otakar. *Čištění průmyslových plynů a exhalací odlučovači*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1974.
- [9] *Požárně technické charakteristiky prachů a jejich význam v technické praxi | BOZPinfo.cz* [online]. [vid. 2021-03-06]. Dostupné z: <https://www.bozpinfo.cz/pozarne-technicke-charakteristiky-prachu-jejich-vyznam-v-technicke-praxi>
- [10] VŠCHT. *Hořlavé a výbušné látky: Rizika spojená s použitím hořlavých a výbušných látek s chemickým průmyslu* [online]. Praha [vid. 2021-5-20]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/kot/resources/studijni-materialy/bchv-p-002/prezentace.pdf>
- [11] *Lower Explosible Limit test / Testing for LEL (MEC)* [online]. [vid. 2021-05-18]. Dostupné z: [https://www.explosiontesting.co.uk/lel\\_and\\_mec\\_14.html](https://www.explosiontesting.co.uk/lel_and_mec_14.html)
- [12] *Opening angle limiter TARGO-VENT | Räjähdyssuojaus | REMBE Oy* [online]. [vid. 2021-03-06]. Dostupné z: <https://www.rembe.fi/products/explosion-safety/explosion-vents/targo-vent/>
- [13] ČESKÁ REPUBLIKA. *Zákon č.201/2012 Sb. o ochraně ovzduší*. In: 2012, ročník 2012, 69/2012, 201/2012.
- [14] ČESKÁ REPUBLIKA. *Vyhláška č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší*. In: . Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2012, ročník 2012, 415/2012.

- [15] *Referenční dokumenty o nejlepších dostupných technikách (BREF) | MPO* [online]. [vid. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecisteni/referencni-dokumenty-bref/referencni-dokumenty-o-nejlepsich-dostupnych-technikach-bref--143226/>
- [16] ODBOR PRŮMYSLOVÉ EKOLOGIE 31200. *Referenční dokument (BREF) o BAT: Kovárny a slévárny* [online]. Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2013 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: [https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecisteni/referencni-dokumenty-bref/2016/12/Bref\\_2005.pdf](https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/prumysl-a-zivotni-prostredi/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecisteni/referencni-dokumenty-bref/2016/12/Bref_2005.pdf).
- [17] BRETSCHNEIDER, Boris a Jiří KURFÜRST. *Technika ochrany ovzduší*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1978.
- [18] STRAUSS, Werner. *Industrial gas cleaning: the principles and practice of the control of gaseous and particulate emissions*. 2d ed. Oxford, New York: Pergamon Press, 1975. International series in chemical engineering, v. 8. ISBN 978-0-08-017004-6.
- [19] *Produkty. HYDRO-TECH* [online]. [vid. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://hydro-tech.hennlich.cz/produkty/trysky-odlucovace-kapek-8360/odlucovace-kapek.html>
- [20] *TECHNOLOGIE OCHRANY OVZDUŠÍ-PDF Free Download* [online]. [vid. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/144371334-Technologie-ochrany-ovzdusi.html>
- [21] *Cyklony-Tigemma* [online]. [vid. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.tigemma.cz/cisty-vzduch/cyklony>
- [22] *Látkové filtry. DEPURO s.r.o.* [online]. [vid. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.depuro.cz/latkove-filtry.html>
- [23] *Popis funkce filtru / ZVVZ* [online]. [vid. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.zvvz.cz/cs/produkty-a-sluzby/odlucovani-a-filtrace/latkove-filtry/popis-funkce-filtru>
- [24] TASARIM, Engin. *Scrubber Systems-Ergil*. *Scrubber Systems-Ergil* [online]. [vid. 2021-05-02]. Dostupné z: <https://ergil.com/>
- [25] *Elektrostatický odlučovač* [online]. 2019 [vid. 2021-05-12]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Elektrostatick%C3%BD\\_odlu%C4%8Dova%C4%8D&oldid=17664476](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Elektrostatick%C3%BD_odlu%C4%8Dova%C4%8D&oldid=17664476)

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbole využívající latinská písmena:

Symbol	Význam	Jednotka
$k$	koeficient zatížení filtrační plochy	$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{min}$
$P$	výkon	kW
$\Delta p$	tlaková ztráta	Pa
$Q$	objem odsávaného vzduchu	$\text{m}^3/\text{s}$
$r$	poloměr potrubí	m
$S$	průřez potrubí	$\text{m}^2$
$S_c$	celková filtrační plocha	$\text{m}^2$
$v$	rychlost proudění	m/s

Symbole využívající řecká písmena:

Symbol	Význam	Jednotka
$\rho_g$	hustota plynu	$\text{kg}/\text{m}^3$
$\eta$	účinnost	W
$\xi$	součinitel odporu zjištěný experimentálně	-



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Emise základních znečišťujících látek [1]</i> .....	11
<i>Obrázek 2 Srovnání velikosti PM částic[6]</i> .....	13
<i>Obrázek 3. Instalovaná membrána odlehčující výbuch [12]</i> .....	15
<i>Obrázek 4 Odloučení vodních kapek z průchozího plynu [19]</i> .....	20
<i>Obrázek 5 Cyklón s tečným vstupem plynu[20],[21]</i> .....	21
<i>Obrázek 6 Hadicový filtr [22]</i> .....	22
<i>Obrázek 7 Regenerace hadicového filtru [23]</i> .....	23
<i>Obrázek 8 3D model skrubru a vizualizace použití v praxi [24]</i> .....	25
<i>Obrázek 9 Princip elektrostatického odlučovače [25]</i> .....	26
<i>Obrázek 10 Filtrační zařízení JET_2_15_4_2_2</i> .....	28
<i>Obrázek 11 Výkonová křivka ventilátoru HPF 1250</i> .....	29
<i>Obrázek 12 Filtrační kapsa nasazená na nosné brance</i> .....	30
<i>Obrázek 13 Zobrazení uspořádání kapes v jedné filtrační jednotce</i> .....	30
<i>Obrázek 14 Detailní pohled na sací potrubí</i> .....	31
<i>Obrázek 15 Ofukové trubky napojené na zásobník stlačeného vzduchu</i> .....	32
<i>Obrázek 16 Skládaná výsypka</i> .....	33
<i>Obrázek 17 Gravitační klapka</i> .....	34
<i>Obrázek 18 Přechodová komora s instalovanými žaluziemi</i> .....	35

## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Meze výbušnosti [11] .....</i>	<i>15</i>
<i>Tabulka 2 Imisní limity vyhlášené pro ochranu lidského zdraví [13].....</i>	<i>16</i>
<i>Tabulka 3 Obecné emisní limity [14] .....</i>	<i>17</i>
<i>Tabulka 4 Vybrané specifické emisní limity [14].....</i>	<i>18</i>
<i>Tabulka 5 Výsledné koncentrace TZL pro čistírnu odlitků [16] .....</i>	<i>18</i>
<i>Tabulka 6 Teplotní odolnost vybraných materiálů [2] .....</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 7 Výpis odsávaných zařízení .....</i>	<i>27</i>
<i>Tabulka 8 Výsledky autorizovaného měření.....</i>	<i>36</i>

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1 Autorizované měření emisí